CURSO de FÍSICA

Índice

Capítulo Primero

La Física considerada en sí misma

A. La Física y su historia

I. ¿Qué es la Física? Definición nominal

La definición nominal de una cosa es la que suele dar el diccionario al explicarnos el nombre que se le da. Es como una explicación inicial por nociones más claras que nos permite saber al menos de qué hablamos.

Pues bien, si acudimos al *Diccionario de la Real Academia Española* para saber qué se entiende por «Física» leemos lo siguiente: "Ciencia que estudia las propiedades de la materia y de la energía, considerando tan solo los atributos capaces de medida". La Física, entonces, es una ciencia, cuyo objeto – se nos dice – es la materia y la energía, y que toma en cuenta sólo lo que puede medirse, es decir, lo que puede expresarse en números y considerarse matemáticamente. Porque las ciencias pueden estudiar diferentes cosas u objetos, y considerarlas de diferente manera, lo que tiene que ver con su método. El método de la Física sería el matemático. Nos quedaría por saber mejor qué es la materia y la energía para entender qué es la Física. Y sospechamos que habrá que estudiar mucha Física para saber qué son estas dos cosas, por lo que no nos aclaró mucho la explicación.

Pero si tomamos una edición más antigua del *Diccionario de la R. A. E.* – tenemos la de 1914 –, nos dice de la Física algo distinto: "Ciencia que tiene por objeto el estudio de los cuerpos y sus propiedades, mientras no cambia su composición, así como el de los agentes naturales con los fenómenos que en los cuerpos produce su influencia". El objeto son los cuerpos en su estado natural (así parece que hay que entender cuando dice: "mientras no cambia su composición"), así como los agentes y fenómenos naturales. Y no dice nada del método matemático. Aunque todavía no sepamos mucho de la Física, al menos es claro qué hay que entender por cuerpos, agentes y fenómenos naturales.

Nos quedaremos, entonces, con la segunda definición, que es más clara y más amplia: *La Física es la ciencia de los cuerpos naturales y de sus propiedades activas y pasivas*, incluyendo a los agentes naturales en las propiedades activas y a los fenómenos en las pasivas. Pero como los diccionarios nos revelan que, aunque esta ciencia es antiquísima, ha sufrido un profundo cambio entre principios y fin del siglo pasado, parece interesante y conveniente hacer un breve repaso de la historia de la Física.

II. Breve historia de la Física

1º Fe y razón

El hombre, a diferencia de los demás animales que tienen instintos naturales, no nace con las disposiciones que le permiten conocer y obrar como conviene para su vida, sino que debe adquirirlas por una lenta educación. De manera que el modo humano de adquirir la ciencia es comenzando por dar fe a un maestro que la enseña, hasta que quede suficientemente ilustrada la razón como para discurrir por sí misma. Para eso se tiene la familia, la escuela y la universidad. La razón no se largaría nunca a andar sin la tutoría de la fe, y nunca alcanzaríamos la ciencia sin un maestro que nos abra la senda que conduce a ella.

Esta simple observación nos permite sacar una conclusión histórica: el primer maestro del hombre no puede ser sino Dios. Así como Dios llenó a los ángeles de sabiduría y virtud, y dotó a los brutos animales de los instintos necesarios para su debida operación, así también tiene que haber sido Dios quien enseñó la ciencia al primer hombre, pues no había para él ni universidad, ni escuela, ni familia. La teoría evolucionista que supone para el hombre un primer estado de brutalidad, del que saldría poco a poco, es una aberración científica que niega la naturaleza humana.

2º La ciencia de Adán

La teología cristiana, fundada en la Revelación divina, nos enseña que Dios creó al primer hombre, Adán, con un fin sobrenatural y en un estado de perfección plena, al que llama de *Justicia original*. "Como las cosas en un

principio – explica Santo Tomás – fueron producidas por Dios, no sólo para que existieran, sino también para que fuesen principios de otras, por eso fueron producidas en estado perfecto, conforme al que pudieran ser principio de otras. Pero el hombre puede ser principio de los demás, no sólo por la generación corporal, sino también por la instrucción y el gobierno. De ahí que el primer hombre, así como fue producido en estado perfecto en su cuerpo para poder engendrar, también fue hecho perfecto en cuanto a su alma para que pudiera instruir y gobernar a los demás. Pero nadie puede instruir sin poseer ciencia. Por lo mismo, el primer hombre fue creado por Dios en tal estado que tuviera ciencia de todo aquello en que el hombre puede ser instruido. Esto es, todo lo que existe virtualmente en los principios evidentes por sí mismos"[1]. Como sigue diciendo Santo Tomás, para instruir y gobernar a la familia humana, Adán debía poseer tanto las ciencias naturales, que proceden de la luz natural, como la sabiduría sobrenatural, que procede de la luz de la fe: "Para el gobierno propio y el de los demás, no sólo es necesario el conocimiento de lo que puede saberse naturalmente, sino de lo que supera el conocimiento natural, pues la vida humana se ordena a un fin sobrenatural, del mismo modo que a nosotros, para gobernar nuestra vida, nos es necesario conocer los contenidos de la fe. Por eso, el primer hombre recibió conocimiento [de todo lo que el hombre puede conocer naturalmente y] de lo sobrenatural tanto cuanto le era necesario para el gobierno de la vida humana en aquel estado"[2].

El Génesis señala que Adán fue capaz de darle nombre a todos los animales de la tierra: "Y Yahvé Dios formó del suelo todos los animales del campo y todas las aves del cielo y los llevó ante el hombre para ver cómo los llamaba, y para que cada ser viviente tuviese el nombre que el hombre le diera. El hombre puso nombres a todos los ganados, a las aves del cielo y a todos los animales del campo" (Gén 2, 19-20). Pero, como dice Santo Tomás, no hubiera podido nombrarlos adecuadamente si no los conociera en su misma naturaleza, y si conocía la naturaleza de todos los animales, con mayor razón la de los vegetales y minerales, y la ciencia de toda la naturaleza: "Como se dice en Génesis, el primer hombre puso nombres a los animales. Como éstos deben acomodarse a la naturaleza, se sigue que Adán conoció las naturalezas de todos los animales y, por lo tanto, la ciencia de todas las demás cosas"[3]. Esta ciencia maravillosa de Adán le había sido infundida directamente por Dios en su mente, pero era la misma ciencia que hubiera tenido si la adquiriera por investigación y experiencia: "El primer hombre poseyó la ciencia de todas las cosas por medio de especies infundidas por Dios. No obstante, esta ciencia no fue distinta de la nuestra, como tampoco los ojos que Cristo dio a un ciego de nacimiento son distintos de los ojos naturales"[4]. Si la poseyera de otra manera, no podría transmitirla a los demás hombres por la enseñanza.

Por el pecado, Adán perdió la gracia divina y todos los dones que de ella fluían, que componían el orden de la Justicia original. Y aunque no se le borró del espíritu todo lo que sabía, ya ni él ni sus hijos tuvieron la claridad interior ni la paz exterior para que pudiera darse una suficiente transmisión. Como los primeros hombres tenían todavía una naturaleza más sana, pues ésta se fue deteriorando con el paso del tiempo y la erosión del pecado, poseían aguda inteligencia, firme voluntad, fortaleza física y larga vida. De allí que hayan podido aprender de Adán muchas cosas sobre la realidad natural, pero estas se fueron transmitiendo como conocimientos dispersos y no como verdaderas ciencias, conocidas con claridad en sus aspectos esenciales. Así vemos a los hijos de Adán saber pastorear los animales y cultivar la tierra, e inventar diversas artes que suponen profundo conocimiento de los minerales: "Lámec tomó dos mujeres: la primera llamada Adá, y la segunda Silá. Adá dio a luz a Yabal, que vino a ser padre de los que habitan en tiendas y crían ganado. El nombre de su hermano era Yubal, padre de cuantos tocan la cítara y la flauta. Silá, por su parte, engendró a Túbal Caín, padre de todos los forjadores de cobre y hierro" (Gén 4, 19-22). Nótese que los que pusieron su espíritu en las artes y técnicas de dominio de la tierra fueron los descendientes de Caín, mientras que los descendientes de Enós, hijo de Set, tercer hijo de Adán y Eva, se preocuparon más por conservar la sabiduría de las cosas divinas: "También a Set le nació un hijo, al que puso por nombre Enós. Éste fue el primero en invocar el nombre de Yahvé" (Gén 4, 26). Que nos sirva de advertencia.

Todo este primer mundo de ciencia sin fe, de Física sin Teología, de cultura sin religión, de humanismo sin Dios, fue borrado de la faz de la tierra por las aguas del Diluvio universal. De las primeras ciencias de las cosas naturales se conservó lo que pudo saber Noé, que ciertamente no sería poco, pues pertenecía todavía a esa primera raza de tan grandes hombres, pero cuyo santo espíritu prefería absolutamente las cosas de Dios. De los hijos de Noé, Sem, Cam y Jafet, se sigue una humanidad de menor condición, lo que se indica por el abreviamiento de la vida. Noé vive 950 años, como los primeros hombres, pero sus hijos y nietos no pasan los 500 años de vida, y

[1] *Suma Teológica*, Iª parte, cuestión 94, artículo 2.
[2] Lugar citado.
[3] *Suma Teológica*, Iª parte, cuestión 94, artículo 2, *sed contra*.
[4] *Suma Teológica*, Iª parte, cuestión 94, artículo 2, a la 2ª objeción.

cuatro generaciones después apenas llegan a los 200 años. Cabe suponer que esta menor longevidad depende también de la pérdida de muchos conocimientos de medicina.

3º La primera ciencia de la razón huérfana

Como en los hijos de Adán, entre los hijos de Noé también aparece el pecado. Cam peca contra su padre y recibe en herencia la maldición de Caín. Sem se destaca por su fidelidad y recibe la bendición de Abel. Y Jafet, que secundó a Sem, recibió una bendición secundaria, como luego la recibirá Esaú: “Maldito sea Canaán! ¡Siervo de siervos sea para sus hermanos! Y después [Noé] dijo: ¡Bendito sea Yahvé, el Dios de Sem, y sea Canaán esclavo suyo! ¡Haga Dios dilatado a Jafet; habite en las tiendas de Sem, y sea Canaán esclavo suyo!” (Gén 9, 25-27). Esta triple sentencia tuvo su consecuencia en el orden de la sabiduría. En la descendencia de Sem se había de conservar la ciencia de Dios, en la de Canaán reinarían las tinieblas de la ignorancia, y en la dilatada descendencia de Jafet, padre de las naciones gentiles, se conservaría por protección divina una cierta rectitud de la razón. Más adelante se cumpliría la profecía de Noé, cuando las naciones gentiles se conviertan al cristianismo y habiten en las tiendas de Sem, abandonadas por el pueblo elegido.

Hasta las primeras generaciones que siguieron a Noé, la inteligencia humana seguía tutelada por la fe en los conocimientos que Dios había dado a los hombres como primera herencia. Pero la soberbia los llevó de nuevo a pecar contra Dios levantando un monumento a la propia grandeza, la torre de Babel, construida entre 500 y 800 años después del Diluvio, y Dios confundió sus lenguas y los obligó a dispersarse por todo el orbe. Junto con las lenguas se confundió también la antigua tradición de las enseñanzas divinas, mezclándose en casi todas partes con mitos y leyendas.



La bendición de Sem se cumplió en Abraham, unos mil años después del Diluvio y dos mil antes de Cristo, renovando la antigua promesa del Redentor, y conservando y haciendo progresar la divina Tradición. Se cumpliría también la maldición de Cam, pues entre los pueblos que nacieron de él se dará la mayor degradación. Y se cumplirá la bendición de Jafet, que consistiría en una preservación de la razón natural por la que conservaría su aptitud para recuperar la fe. Uno de los siete hijos de Jafet fue Javán, Ἰάων o Ἴων en griego, de quien desciende el pueblo de los *iavones* o *iones*, es decir, los jonios[1]. Fueron de los primeros habitantes de la Antigua Grecia, creadores de la cultura micénica hacia el año 2.000 a. C. En el s. XII a. C. fueron desplazados por la invasión dórica y emigraron a las costas e islas adyacentes del Asia Menor, fundando las ciudades de Mileto, Éfeso, Samos y otras en lo que luego se llamaría la Jonia. En las colonias jónicas, en estrecho contacto con las culturas del Cercano Oriente, renació la ciencia de la naturaleza en un estado que podríamos llamar de orfandad, pues la tradición religiosa estaba tan deformada que ya la razón no podía apoyarse en ella.

La primera escuela de pensamiento aparece en Mileto, a fines del s. V a. C., fundada por Tales, cuyo nombre siempre encabeza la lista de los antiguos *Siete Sabios* griegos. Gran matemático[2] y astrónomo, predijo un eclipse de sol que aconteció en una batalla entre medos y lidios (28 de mayo de 585 a. C.). Dice Platón que “por tanto mirar al cielo, no se daba cuenta de lo que tenía debajo de los pies”, por lo que cayó en un pozo, siendo objeto de las mofas de una vieja. Pero no siempre estaba tan fuera de las cosas terrenas, pues previó un buen tiempo para las aceitunas y, alquilando todas las prensas de Mileto, se enriqueció, demostrando – señala Aristóteles – que

[1] Jafet tuvo siete hijos. De *Gomer* vienen los celtas, de *Magog* las razas germano-eslavas, de *Madai* los medas, de *Javán* los jonios y helenos en general, de *Tubal* los habitantes del sur del Cáucaso, de *Mosoc* los muski (de donde viene Moscú) que habitaban entre el mar del Norte y el mar Caspio, y de *Tiras* los tracios. “De éstos – dice el Génesis – se poblaron las islas de las gentes en sus tierras, según sus lenguas, familias y naciones” (10, 5).

[2] El «teorema de Tales», que establece las proporciones de los segmentos de dos rectas concurrentes cortadas por paralelas, es el principio fundamental de la trigonometría. Con estas relaciones, Tales inventó un método para medir la distancia de un navío en el mar.

"la filosofía no era una cosa inútil". Tales tuvo como discípulo y compañero a Anaximandro, y éste a Anaxímenes. Estos primeros pensadores milesios fueron llamados «físicos» por Aristóteles, porque consideraron como problema fundamental la φύσις o «naturaleza». Como todos los hombres, estos sabios se admiraban por los cambios cíclicos de las cosas tanto del cielo como de la tierra, así como de la constante generación y corrupción de los seres. Pero tuvieron una diferencia, en lugar de pedir a la tradición religiosa la explicación de todas estas cosas, como era evidente que ésta había sido deformada, buscaron la respuesta con la sola luz de su razón.

Investigaron cuáles eran los principios ocultos de las cosas que hacían que éstas cambiaran siempre de la misma manera. A estos principios los griegos los llamaron «naturaleza». El problema, entonces, que plantearon los primeros científicos, fue la aparente contraposición de *lo cambiante y lo permanente*, o lo que es lo mismo, de *lo contingente y lo necesario*. Y la respuesta debería hallarse al descubrir la «naturaleza», que es lo permanente y necesario de las cosas.

La Física, entonces, fue la primera ciencia que procuró la razón huérfana. Aunque ¿no se dieron antes las Matemáticas en Egipto? Es verdad que los egipcios y babilónicos utilizaron recursos matemáticos bastante sofisticados desde mucho antes que los griegos, pero no constituyeron estos conocimientos en un sistema lógico ordenado, con principios y demostraciones, que pudiera recibir el nombre de ciencia. Fueron también los griegos, comenzando con Tales de Mileto y Pitágoras de Samos, quienes lo hicieron, y siempre aplicadas al conocimiento de la *naturaleza*. Los griegos tuvieron el don divino de saber pensar con rigor, investigando las causas proporcionadas y discurriendo con coherencia. Así cumplía la Providencia con la bendición de Jafet.

4º La Física griega

En el pueblo griego, lleno de preguntas y ávido de respuestas (al escéptico le gusta preguntar, pero no le importa la respuesta, como a Pilato: *Quid est veritas?*), pronto se multiplicaron las escuelas de *filósofos*, esto es, amantes de la sabiduría. ¿Qué es aquello que permanece como fuente y sustrato de todos los cambios naturales? Tales había dicho el agua; Anaximandro el ἄπειρον, es decir, lo ilimitado, lo indefinido, lo indeterminado; Anaxímenes dice el aire; Heráclito el fuego. Empédocles sostiene la doctrina ecléctica de los cuatro elementos: fuego, aire, agua y tierra.

Pero no basta determinar este sustrato o – como lo llamará Aristóteles – *materia* de los cambios, sino que deben darse principios que expliquen la producción misma de los cambios, causas agentes o *eficientes*. Anaximandro va a hablar de un proceso de separación o diferenciación de contrarios, que comenzaría por la separación de lo caliente, que envuelve a lo frío. Lo caliente habría ido secando lo frío, formando finalmente cuatro círculos concéntricos: el Fuego (caliente), el Aire (frío), el Agua (húmeda) y la Tierra (seca). Anaxímenes completa la idea de la separación distinguiendo un par de fuerzas cósmicas contrarias, la condensación y la dilatación. La condensación causaría el enfriamiento y la dilatación o rarefacción el calentamiento. Del aire enrarecido se origina el fuego, y del aire condensado primero el agua y luego la tierra. Los pitagóricos continuarán la reflexión de los milesios, poniendo especial atención al problema de la multiplicidad y la oposición de contrarios. Relacionan la oposición fundamental de Anaximandro entre lo limitado y lo ilimitado con la oposición entre lo vacío y lo lleno, el ser y el no-ser.

Elementos	*Seco*	*Húmedo*
Cálido	⇩ Fuego ⇦	Aire ⇧
Frío	⇩ Tierra ⇨	Agua ⇧

Los pitagóricos, discípulos del legendario Pitágoras de Samos, isla vecina de Mileto, investigaron también la naturaleza de las cosas por la proporción y armonía de sus elementos, que creían poder expresar en números. De hecho descubrieron las proporciones matemáticas que rigen las armonías de los sonidos musicales. Sostuvieron, entonces, que las matemáticas podían dar a conocer las formas o esencias de todas las cosas, tal como sueñan también ahora los físicos modernos.

Siguiendo esta línea de investigación tanto del sustrato como de la esencia misma de las cosas, así como de las causas eficientes de los cambios, Parménides de Elea, colonia de la Magna Grecia, sur de Italia, planteó un dilema que cerró los horizontes de la Física, obligando a reconocer que la respuesta última al porqué de las cosas debía hallarse en una ciencia que trascendiera la ciencia de la naturaleza. Parménides sostuvo que el sustrato o substancia de todas las cosas no es propiamente ni el agua, ni el aire, ni el fuego ni, menos, la tierra, sino el ser. Porque si todas esas cosas pueden decirse sustrato de algo, es porque son, pues si no fueran, nada serían ni nada harían. Pero si la esencia o substancia de las cosas es el ser, cuando algo cambia de agua a aire, en realidad no cambia, pues tanto el agua como el aire son. El único cambio verdadero sería de ser a no-ser o de no-ser a ser.

Ahora bien – y aquí aparece el dilema –, el ser es necesariamente eterno y perfecto, inmutable, por lo que el cambio es imposible. El ser por su misma esencia es; para cambiar algo se le tendría que oponer, y lo único

opuesto al ser es el no-ser; pero el no-ser no es peligroso y no puede gran cosa, porque no es, y lo que no es nada hace. El ser, entonces, no puede terminar, y menos todavía empezar, pues tendría que provenir del no-ser, y del no-ser nada viene, porque nada es. Lo que decía Parménides no era juego de palabras ni tontería, pues pensemos nosotros, que somos cristianos, que el Ser es Dios, y que Dios no puede ser producido ni destruido, que es eterno y perfecto, y que aun habiendo creado todo el universo, no por eso cambia ni es mejor. Muchos comprendieron el problema, pero ¿quién se atrevía a resolverlo?

Si agregamos a Anaxágoras, que habló de una Inteligencia que ordenaba las cosas con el fin de que se den de la mejor manera, tenemos cuatro posibles respuestas a los porqués que plantea la observación de la realidad natural, las que Aristóteles denominó las *cuatro causas*: la *materia* (el agua, el aire, etc.), la *forma* (la proporción, el ser), el *agente* o causa *eficiente* (los pares de contrarios, como el frío y el calor) y el *fin* (lo que se propone la Inteligencia). Cuando buscamos lo que explica los cambios y permanencia de las cosas naturales, es decir, la naturaleza o los principios naturales, debemos saber que nuestras respuestas serán de cuatro clases, según las cuatro causas naturales: materia, forma, agente y fin.

Pero cuando nos preguntamos no tanto por el *cambio*, sino por el *ser* mismo de las cosas, en toda su profundidad, entonces tendremos que elevar nuestro espíritu más allá de la Física, o dicho en griego: μετὰ τὰ φυσικά, para hallar el Principio de todas las cosas, que no es otro que Dios. Ya no es la Física, ciencia de la naturaleza, lo que necesitamos, sino la Metafísica o Teología racional.

5º La Física aristotélica

Cuando todas estas teorías sobre la naturaleza se dieron cita en Atenas, junto con las artes y la política, convocadas por el gran mecenas Pericles, y la sabiduría se puso de moda banalizándose, se produjo una reacción de escepticismo y aparecieron los autodenominados sabios o *sofistas*. Estos vendían sus lecciones de retórica, que permitía a cualquiera hablar con elocuencia de todas las cosas, demostrando el pro y el contra, según conviniera. Sostuvieron que «el hombre es la medida de todas las cosas», porque la verdad no sería medida por lo que son las cosas, sino por la opinión que los hombres se forman de ellas.

En esta tempestad en que parecía naufragar la vocación griega por la sabiduría racional, surgió un piloto que la supo capear: Sócrates. Dios cumple con sus promesas. Sócrates no se interesó tanto por las ciencias de la naturaleza, sino por las ciencias del hombre, que era lo primero que había que salvar. A diferencia de los sofistas, se presentó a sus discípulos con pobreza y humildad, no para venderles vana palabrería, sino para abrirles el camino a la conquista de la verdad. Su aporte principal fue poner las bases del buen método para alcanzar la ciencia. Éste tenía dos partes:

- *Primero* les presentaba un problema y les hacía medir su dificultad. Para ello usó genialmente de la ironía, por la que destruía la vana impresión de sabiduría que imperaba en la época, llevando al discípulo a declarar «sólo sé que no sé nada». Aunque es claro que la ironía no es la única manera (fácilmente se puede abusar), lo que importa es tantear las opiniones en pro y en contra para medir la dificultad que ofrece la respuesta.
- *Después* los ayudaba a distinguir lo esencial de lo accidental, alcanzando la definición del sujeto del problema, de la que luego se seguía fácilmente la solución de la cuestión planteada. Así de sencillo es el antídoto perfecto para el veneno del escepticismo. Las verdades más altas suelen estar selladas por la simplicidad, la más divina de las cualidades.

Las cosas materiales sólo pueden heredarlas muchos si se toman en partes, y mientras más las reciben, más se disgregan, pues las partes son más pequeñas; las cosas espirituales, en cambio, sólo pueden recibirse si se toman enteras, y mientras más la reciben, mejor se conservan. Aunque fueron muchos los jóvenes tocados por la prédica de Sócrates, sólo uno fue capaz de recibir su herencia: Platón, lo que no ayudó para que permaneciera. Sócrates había enseñado a descubrir en el hombre y en la sociedad la esencia de la justicia, de la belleza, de la bondad. Y Platón quedó deslumbrado al contemplar que en las cosas hay una esencia o idea que les hace ser lo que son, y que evidentemente refleja una perfección eterna y divina. Su reflexión se orientó principalmente a descubrir el primer origen de las esencias de las cosas, que creyó verlo en las Ideas divinas. Esta polarización de su interés y la observación de que las cosas naturales no permanecen en el ser, lo llevó a sostener que no es posible una verdadera ciencia de la naturaleza, pudiendo a lo más formarse sólo una opinión de las realidades naturales. En esto siguió a su manera la sentencia de Parménides.

Platón tuvo a su vez un único discípulo, único al menos que mereciera con verdad este nombre: Aristóteles. A la genialidad de Platón, Aristóteles le sumó algo muy griego y muy socrático: el rigor del método. Se tomó un

enorme trabajo en desarrollar y exponer el método científico, dejando para la posteridad el tesoro invaluable del *Organon*, una serie de tratados sobre el arte de pensar. Esto le permitió distinguir claramente las ciencias por sus sujetos y por sus maneras de proceder, esto es, por sus diferentes métodos. Precisó el proceder de la ciencia universal – la que interesó a Platón –, cuyo sujeto es «lo que es», el *ente*, considerado *en cuanto que es*, a la que llamó *Filosofía Primera*, la *Metafísica*, como se la llamó después. Distinguió también el sujeto y el método de las Matemáticas, que estudian los cuerpos en el aspecto de su cantidad. Y pudo corregir a Platón mostrando que también se da una verdadera ciencia de la naturaleza, que estudia las cosas corporales en cuanto sujetas al cambio y movimiento. Es más, Aristóteles sólo pudo esbozar un Tratado de Filosofía Primera, o Metafísica; no se interesó por redactar ningún tratado de Matemáticas; pero desarrolló de manera muy completa toda una serie de tratados de ciencias naturales, que representan otro tesoro de valor incalculable. Citemos los principales:

- *Curso de Física*, Φυσική ἀκρόασις, como lo llamó Andrónico de Rodas, el primer editor de las obras de Aristóteles. Cuenta con ocho libros y trata de los aspectos más generales de las ciencias de la naturaleza. Es una *física general*.
- *Acerca del cielo*, en cuatro libros, donde trata del universo en general y de sus principios y partes principales, lo que hoy llamaríamos una *cosmología*.
- *Meteorológicos*, también en cuatro libros, donde estudia los fenómenos que se dan en la esfera sublunar, según la concepción griega del cosmos.
- *Acerca de la generación y corrupción*, en dos libros, que trata de los cambios que se producen en la tierra, y que podría asimilarse a una *química*.
- *Acerca del alma*, en tres libros, donde trata del alma como principio de los vivientes, tanto vegetales y animales como del hombre, tratado de primerísima importancia, junto con el de la Física.

Aristóteles no tuvo ningún discípulo, ninguno al menos que supiera mantener viva su herencia. Quedaron sus escritos mucho tiempo ocultos en un sótano, que la Providencia, fiel a sus promesas, impidió se perdieran. Pero son escritos casi jeroglíficos en su gran mayoría, pues son como las notas que se hace el maestro para guía de sus explicaciones orales. Para dar vida a este cuerpo muerto haría falta un espíritu gemelo de aquel maestro griego para rehacer de esas notas el verdadero pensamiento aristotélico. Este vendría mucho tiempo después, cuando estuviera Jafet ya bien instalado en las tiendas de Sem.

6º La redención de la inteligencia

Estos destellos de inteligencia que fueron los dos grandes hijos de Sócrates, Platón y Aristóteles, le confirieron a la ciencia griega un misterioso prestigio. Decimos misterioso porque todos sabían que a los griegos los había visitado la Sabiduría, pero ya no hubo nadie capaz reentenderla. Las escuelas griegas y romanas apenas si conservaron algo de la lógica de Aristóteles y algo de una ética más platónica que aristotélica. De las ciencias de la naturaleza se conservó poco y nada. Y por todas partes amenazaba la tentación del escepticismo.

Para que la razón pudiera rehacerse debía recuperar la tutela de la Fe verdadera. Y esto fue obra de Jesucristo y su Iglesia. Cuando la luz de la Revelación cristiana volvió a brillar sobre las tinieblas de este mundo, ahora conservada y difundida por el magisterio infalible de la Iglesia, la inteligencia humana se vio purificada y protegida, y se animó como nunca en procurar toda ciencia: "Examinadlo todo y quedaos con lo bueno" (I Tes 5, 19-21).

En un principio la atención se puso exclusivamente en la ciencia de Dios y en la moral cristiana, así como en la defensa de la Revelación contra las herejías, considerando la naturaleza sólo como peldaño para elevarse a su Autor. La física griega, a la que había ocasión de referirse al comentar en el Génesis la obra de los seis días, era mirada más bien con desconfianza por los Santos Padres, pues parecía contradecir en muchos aspectos la Sagrada Escritura. Pero una vez que el magisterio de la Iglesia hubo definido los dogmas fundamentales de la doctrina cristiana, se tuvo seguridad y libertad para volver la mirada a las ciencias de la naturaleza. San Isidoro de Sevilla (m. 636) compiló fragmentos de autores paganos y cristianos sobre las ciencias profanas en sus *Etimologías* y *De natura rerum*. Otros siguieron su ejemplo en la redacción de estas maneras de enciclopedias, como Beda el Venerable (alrededor de 672-735) con otra *De natura rerum*, y Rábano Mauro (776-856) y su *De universo*.

7º La Escolástica y las ciencias de la naturaleza

La Escolástica es el movimiento intelectual de las Escuelas cristianas que floreció principalmente entre los s. XI y XIII. Su característica principal es la armoniosa subordinación de la razón a la fe, de la que se siguen dos cualidades fundamentales: primero, el cultivo del buen método de pensar; segundo, la subordinación de todas las ciencias a la teología. En cuanto a lo primero, la Escolástica se destacó por la estima de la lógica aristotélica;

y en cuanto a lo segundo, por el respeto del magisterio de la Iglesia. De aquélla apenas si se poseía el tratado de las *Categorías*, con la *Isagogé* o propedéutica de Porfirio, y los *Primeros Analíticos* o tratado del silogismo. Pero bastaron para alentar al uso cuidadoso del pensamiento.

Animados por esta doble confianza en el rigor de la razón y en la autoridad de la Iglesia, los escolásticos tuvieron una curiosidad universal: no hubo aspecto de la verdad que no quisieran investigar. Y cuando en el s. XII llegaron a sus manos las obras de Aristóteles, a través de los árabes, se entregaron a su estudio con una mezcla de admiración por lo que hace a la razón, y de desconfianza por lo que hacía a la fe. Combatida en un primer momento por las autoridades eclesiásticas, porque no faltaban negligentes que sostenían doctrinas que se atribuían a Aristóteles contrarias a la fe, gracias a la autoridad de San Alberto Magno y, sobre todo, de Santo Tomás de Aquino, el aristotelismo fue entendido, saneado e incorporado como herramienta de razón al servicio de la teología y de toda ciencia que quiera merecer tal nombre.

Con este propósito, Santo Tomás – el espíritu gemelo de Aristóteles que la Providencia quiso dar a la Iglesia, capaz de comprender desde el alma la doctrina del gran griego y ponerla al servicio de Jesucristo – comentó literalmente, frase por frase, la mayor parte del *Corpus* aristotélico. De la lógica de Aristóteles explicó los dos libros más difíciles: el *Perihermenias* y los *Segundos Analíticos*. Como su interés era exclusivamente teológico, comentó especialmente la *Ética* y la *Metafísica*, así como parte de la *Política*. Y podría pensarse que Santo Tomás no tendría mayor interés en los tratados de filosofía natural, por hallarse distantes de los asuntos teológicos, pero se estaría muy errado. El Aquinate se tomó un inmenso trabajo en explicar en detalle todos estos tratados: la *Física* (cuyo comentario completó), *Acerca del cielo*, los *Meteorológicos*, *Acerca de la generación y corrupción*, el tratado *Acerca del alma* y otros menores, trabajo que quedó truncado por su temprana muerte. Esto no quiere decir que Santo Tomás se preocupara por otras cosas además de la Teología, sino que las ciencias de la naturaleza están muy lejos de ser ajenas a la fe. Las realidades naturales son las únicas que se ofrecen inmediatamente a los sentidos del hombre, y el camino para elevarse a las realidades espirituales pasa por ellas.

8º Progresos de una física antiaristotélica no científica

Con Santo Tomás se alcanzó la más perfecta armonía entre la razón y la fe. Mostró con maravillosa claridad cómo los *libros del hombre* – como podemos llamar al *Corpus* aristotélico, pues son expresión del recto uso de la razón humana – se abrían perfectamente al *Libro de Dios*, la Biblia, expresión de la revelación divina, dando lugar a la más sólida y cristiana Teología. Es verdaderamente maravilloso comprobar cómo los instrumentos racionales aristotélicos permiten penetrar tan profundamente en los más altos misterios del cristianismo.

Pero en este mundo de tinieblas la verdad no brilla sin sufrir agresión. En aquellos precisos momentos de esplendor de la Cristiandad, en que la sabiduría católica alcanzaba su mejor expresión con la *Suma Teológica* de Santo Tomás, se redoblaron los esfuerzos por atenuar su luz, porque – hay que decirlo – los mismos cristianos temen la claridad de Dios. Se dio el siguiente proceso, que sintetizamos sin intentar demostrarlo: Por impulso de tibieza, se quiso atenuar la claridad de la Revelación, que predica la temida doctrina de la Cruz; para excusarse ante Dios, se echó la culpa a los hombres de Iglesia; para no ser declarado hereje por la jerarquía eclesiástica, se echó la culpa a la teología escolástica; para no ponerse en contra al poderoso clero, se culpó a Aristóteles; y como no era fácil criticar la Lógica, ni la Ética, ni la Metafísica aristotélica, se cargó contra la Física. Porque se hacía fácil criticarla, pues más allá del método general y de los principios insustituibles de las ciencias de la naturaleza, que sólo se encuentran en el aristotelismo, Aristóteles propone muchas opiniones sobre fenómenos particulares que se fueron mostrando como discutibles o erróneas. El ataque, entonces, procedió así: Se refutaron con gran escándalo opiniones físicas particulares de Aristóteles; de allí se desprestigió toda su Física como inválida; como realmente los principios físicos sirven de base a todo el aristotelismo, se lo condenó por entero; al pretender que el aristotelismo era inválido, se desprestigió toda la escolástica, siendo invadida la Cristiandad por una ola de escepticismo en la aptitud de la razón para explicar la fe; y con el desprestigio de la escolástica y de la misma razón teológica, se atacó al propio magisterio de la Iglesia, que la sostenía. El modernismo actual que ha puesto en crisis a la Iglesia es consecuencia de este largo proceso.

Contra la Física aristotélica, única propiamente científica, pues enseña el método para investigar las causas de las realidades naturales, se levantó una Física puramente empírica y descriptiva, negada a la reflexión propiamente intelectual. La investigación física siempre arrancó de un análisis empírico de los fenómenos naturales, tal como se ofrecen a nuestros sentidos; y siempre puso el acento en la descripción de estos procesos, con la intención de compararlos y entenderlos. En muchos casos la investigación no puede pasar de allí, sobre todo en aquellos fenómenos en los que el hombre no tiene casi acceso, o por infrecuentes o por lejanos. Los antiguos cultivaron,

por ejemplo, la astronomía, que consiste en la descripción de los movimientos de los cuerpos celestes, intentado descubrir sus regularidades cuantitativas. El despertar de la curiosidad científica que se dio con la Escolástica, llevó también a observar y describir con renovada atención tanto los fenómenos celestes como los terrestres. Pero al volver estas nuevas observaciones contra la Física de Aristóteles, en lugar de investigarlas con los principios y método aristotélicos, se cortaron el camino de la ciencia.

Habiendo renunciado al buen método científico, en el Renacimiento se dio todo tipo de pseudo filósofos de la naturaleza: panpsiquistas, astrólogos, alquimistas, teósofos, etc. Pero a falta del bueno, el único método que fue triunfando en el análisis de la observación empírica, por su indiscutido rigor y por su maravilloso éxito, fue el cuantitativo, es decir, el matemático. Poco a poco se impuso la convicción que lo más que se podía esperar en la investigación de la naturaleza, era descubrir correlaciones cuantitativas entre los diversos aspectos observables, reduciendo todo a la dependencia de ciertos parámetros fundamentales, los primeros de los cuales serían el espacio y el tiempo.

Quien logró una resonante conquista por esta vía, y terminó de imponer este modelo de Física, fue Isaac Newton, con la publicación de su obra *Principios matemáticos de la filosofía natural* (1687). Partiendo de tres principios de simple expresión, estableció unas leyes cuantitativas que no sólo explicaban con precisión el movimiento de los cuerpos terrestres, sino también – y aquí estuvo lo grandioso – el de los cuerpos celestes. La Física prometía cumplir el sueño de los primeros sabios griegos de una ciencia universal.

Con Newton empieza la historia de la Física moderna, que aunque ha comprobado que las leyes newtonianas no son tan universales como querían, sigue con la pretensión de una explicación matemática de toda la realidad. Nosotros, por ahora, aquí dejamos nuestra breve historia.

B. Importancia y método del Curso de Física

I. Propósitos de nuestro Curso de Física

“En todas las cosas mira el fin”[1], pues del fin que una empresa se propone se sigue su importancia. En nuestro *Curso de Física* nos proponemos tres fines, uno superior, otro propio y un tercero propio también pero secundario. El fin superior es la defensa de la fe cristiana. El fin propio es la formación del joven en orden a las ciencias de la naturaleza. El fin secundario es advertirlo de los vicios científicos de la Física nueva.

1º Fin superior. La defensa de la fe cristiana

Alguno podría ingenuamente pensar que nada tiene que ver la Física con la fe. Pero ya señalamos en la Breve historia cómo se atacó la Física aristotélica para derrumbar la teología escolástica y, con ella, el magisterio eclesiástico. Por referir el caso más emblemático, al haber revestido de autoridad científica a la falsa hipótesis de la evolución, se hace imposible entender el Génesis a la letra – como pide el Magisterio – y casi imposible creer en el dogma del pecado original. Ya sea sosteniendo falsas teorías disfrazadas de científicas, ya sea sacando conclusiones ilegítimas de hipótesis científicas plausibles, no deja de atacarse a la Iglesia de Cristo con las armas de la nueva ciencia. Véase, por ejemplo, lo que dice Stephen Hawking, hoy aplaudido como sabio del nuevo siglo, pasando de lo físico a lo teológico sin ningún sentido: “Con el éxito de las teorías científicas para describir [matemáticamente] acontecimientos, la mayoría de la gente ha llegado a creer que Dios permite que el universo evolucione de acuerdo con un conjunto de leyes, en las que él no interviene para infringirlas. Sin embargo, las leyes no nos dicen qué aspecto debió tener el universo cuando comenzó; todavía dependería de Dios dar cuerda al reloj y elegir la forma de ponerlo en marcha. En tanto en cuanto el universo tuviera un principio, podríamos suponer que tuvo un creador. Pero si el universo es realmente autocontenido [como sugiere este autor], si no tiene ninguna frontera o borde, no tendría ni principio ni final: simplemente sería. ¿Qué lugar queda, entonces, para un creador?”[2]

Al mostrar cómo los principios y el método aristotélicos son el camino único y siempre válido para desarrollar una Física verdaderamente científica, quitamos graves obstáculos que han hecho tropezar en la fe a tantos cristianos. Es absolutamente necesario que al menos los cristianos tenga por cierto que no sólo no hay contradicción entre la fe y la razón, sino que – como dijimos al principio – la razón nunca caminaría más segura que bajo la tutela de la fe católica.

---

[1] Kempis, *La imitación de Cristo*, libro I, inicio del capítulo 24. Cf. Eclesiástico 7, 40.

[2] Stephen W. Hawking, *Historia del tiempo. Del big bang a los agujeros negros*, Editorial Crítica (Grijalbo), Buenos Aires 1988, p. 186.

2º Fin propio. La formación del joven en ciencias naturales

La fe y la gracia de Dios necesitan una mente clara, una razón recta con ansias de conocer la verdad y apta para la contemplación. Para esto coopera no poco una buena iniciación filosófica, que no es otra cosa que aprender a bien pensar. Mas vale aquí hacer una advertencia. Por «iniciación filosófica» hoy se tiende a pensar en un resumen de historia de la filosofía, con lo que se malexplican una serie de «sistemas filosóficos», de lo que no queda ninguna idea clara, sino la contraria impresión de que se puede pensar de cualquier manera. Hay muchas maneras de pensar mal, pero una sola de pensar bien, y es la que enseñó Aristóteles y adoptó Santo Tomás. Una «iniciación filosófica» es una iniciación en la filosofía aristotélica, en lo que nunca viene mal ponerla en marco histórico.

En la filosofía aristotélica puede haber iniciación porque, como sigue el buen método de pensar, arranca de las nociones de sentido común y de los procesos que naturalmente sigue la inteligencia, y poco a poco se eleva a precisiones más sutiles, que no cualquier inteligencia puede captar. El joven recién comienza a pensar, y así como no tiene el cuerpo preparado para grandes exigencias, haciéndole daño el someterlo al ejercicio propio de un militar de 20-25 años, mucho menos preparada tiene la inteligencia, que en su desarrollo es más lenta (porque es eterna, a diferencia del cuerpo que es temporal), por lo que no conviene pedirle que enfrente las distinciones ya propiamente filosóficas, que suponen una madurez que apenas si se alcanza a los 30. Se trata, entonces, de encaminar la mente del joven en las vías de cada una de las ciencias, sin pretender llevarlo más allá de las primeras nociones y distinciones más evidentes[1].

En nuestro *Curso de Física*, en particular, nos fijamos tres objetivos que están asociados a los tres «modos de hacer ciencia» (*modi sciendi*):

- *Primero*, **definir**. Ir mostrando cómo se alcanza la definición esencial de aspectos accidentales de las cosas naturales, como la cantidad, ciertas cualidades: potencias activas y pasivas, cualidades pasibles, figuras; la ubicación espacial y temporal, definiendo lugar y tiempo. De esta manera se prepara la comprensión de la distinción entre substancia y accidente.
- *Segundo*, **dividir**. Comenzar el análisis del movimiento con el cambio más superficial, que es el local. Se prepara así el comprender la distinción fundamental entre materia y forma (la que no se pretende explicar en el nivel secundario).
- *Tercero*, **demostrar**. Se hace una primera aplicación del principio de causalidad respecto del movimiento local, iniciando así la comprensión de las causas por la más evidente, que es la causa eficiente.

De esta manera el alumno se inicia en el método científico y en la observación de los fenómenos naturales.

3º Fin secundario. Justa crítica de la Física moderna

La Física moderna ha ido tendiendo a constituirse como ciencia mixta, es decir, una ciencia con finalidad natural pero con método matemático, siendo entonces mixtura de Física y Matemáticas. Pero como ignora el verdadero método científico, no está advertida de las limitaciones de su método propio. Y como a esto se suma su éxito técnico y la ausencia de la Teología como ciencia rectora de los saberes, los físicos se permiten excursiones indebidas fuera sus propios ámbitos científicos. Conviene señalarlo a los alumnos, para que luego no se deslumbren fácilmente por los sofismas pseudocientíficos que hoy pululan en nuestro pobre mundo.

Además, más allá de los falsos pasos de los físicos actuales, conviene ir mostrando más en lo particular las diferencias entre el método verdaderamente científico y el método puramente matemático. En cuanto a esto, lo primero que hay que señalar es que la Física matemática parte de la numeración del tiempo como de un dato inicial, en razón del cual todo lo demás se va definiendo, y nunca se puso a analizar en qué consiste el tiempo, lo que no es tan fácil de mostrar. La Física nueva peca así contra el primer principio del método científico, que consiste en aclarar los oscuro a partir de lo claro, de lo evidente, no siendo tan inmediatamente evidente decir qué es el tiempo.

II. EL MÉTODO A USAR EN LAS CIENCIAS NATURALES

Algo se dijo acerca del método científico en general en el curso de Lógica, y aquí lo iremos aprendiendo a medida que lo usamos, pues nadie aprende a cabalgar con lecciones de a pie, sino cabalgando. Pero antes de empezar conviene saber qué es un caballo, y dónde está el estribo para poner el pie y las riendas para poner las manos. Conviene, entonces, que hagamos algunas breves observaciones iniciales.

---

[1] Al dar el Curso de Física, no debe pretenderse explicar la distinción aristotélica entre materia y forma, pues no están en condiciones de entenderla. Sólo cabe señalar la distinción vulgar que se sigue de ejemplos tales como la materia y la figura de una estatua.

1º El camino de la ciencia se encuentra sabiendo preguntar

La admiración es el sentimiento del alma filosófica ante un problema que se plantea, por lo que espontáneamente se expresa a modo de pregunta. Podemos decir entonces que la Filosofía comienza con la pregunta. Pero como la Filosofía debe llevarse adelante según las reglas del arte de bien pensar, esto es, según las reglas de la Lógica, lo primero que debemos procurar es hacer la buena pregunta, porque quien no aprende a preguntar con orden nunca alcanzará la ciencia: "Los que quieren investigar con éxito han de comenzar por plantear bien las dificultades, pues el éxito posterior consiste en la solución de las dudas anteriores, y no es posible soltar, si se desconoce la atadura… porque los que investigan sin haberse planteado antes las dificultades son semejantes a los que desconocen adónde se debe ir, y, además, ni siquiera conocen si alguna vez han encontrado o no lo buscado"[1].

La Lógica enseña que, frente a un problema, hay cuatro preguntas fundamentales que deben plantearse en su orden: *an sit, quid sit, quia est, propter quid*.

• La primera: «si es» (*an sit*), pregunta por la existencia de la cosa en relación a la cual se plantea el problema. ¿Se trata de un conejo verdadero o de uno de peluche? ¿Es el sol lo que se apaga u otra cosa? Porque no hay verdaderos problemas sino sobre sujetos que verdaderamente existen.

• La segunda pregunta: «qué es» (*quid sit*), reclama la definición más exacta posible del sujeto del problema, porque de allí ciertamente saldrá la posible explicación. ¿Qué es un conejo? Un ser viviente. ¿Qué es el sol? El astro del día.

• La tercera pregunta: «si es así» (*quia est*), busca confirmar la existencia real del problema entre el sujeto y la otra cosa que interviene en su proposición. ¿El conejo es producido efectivamente por el sombrero? Evidentemente no, pues un ser viviente no puede provenir de un no viviente; sólo lo vemos salir del sombrero, que no es lo mismo. ¿El sol se apaga al mediodía? Sí, en ciertas circunstancias se observa que pierde parcial o totalmente su brillo.

• La cuarta pregunta: «por qué es así» (*propter quid*) investiga finalmente la causa oculta por la cual se ha producido el fenómeno que nos admiró. Cómo puede ponerse un conejo en un sombrero sin ser advertido. Qué puede ocultar el sol que no sean las nubes.

Las preguntas primera y tercera son cuestiones de existencia, a contestar normalmente a partir de la experiencia sensible, y necesarias para no detenerse en problemas falsos de cosas que no se dan. La cuarta es la cuestión científica por excelencia, pues la ciencia busca saber el *porqué* de todo problema. Esto nos permite suponer la importancia que tiene la segunda pregunta, porque si el método es bueno, quiere decir que la respuesta al *propter quid* se hace posible si respondemos antes el *quid sit*. Y así es. La definición del sujeto del problema, que responde al *quid sit*, es siempre más simple y evidente que el problema mismo que se plantea entre el sujeto y el atributo o fenómeno en cuestión. Y al definir el sujeto sale más fácilmente a luz la causa explicativa que en un principio se ocultaba. Si el sol es por naturaleza el astro del día, su brillo no puede apagarse al mediodía por una causa intrínseca sino extrínseca: un cuerpo opaco que se interponga.

2º El camino de la ciencia comienza por lo más evidente y general

Otra regla que la Lógica nos pide observar, tan fundamental como la anterior, es que los problemas deben plantearse yendo *de lo más general a lo más particular*. Si vamos a considerar la ciencia del hombre o Antropología, no conviene comenzar investigando la psicología de la mujer o las características raciales de los chinos, sino que debemos investigar aquellos aspectos generales que se dan en todos los hombres, para luego agregarles los que distinguen al varón de la mujer, o las diversas razas. Y por lo mismo, como el hombre es un ser viviente, junto con los demás animales y plantas, conviene haber estudiado con anterioridad las características generales de los vivientes, desarrollando la Biología, para luego considerar cómo se dan en particular en el hombre.

Esta manera de proceder ofrece una doble ventaja. En primer lugar, lo general es más simple y, por lo tanto, más evidente, mientras que lo particular es más complejo y, entonces, más difícil; por lo que vamos, como conviene, de lo más claro a lo más oscuro. Segundo, evita repetir para cada caso particular el estudio de aquellos aspectos comunes con otros casos.

De allí que la buena manera de definir una cosa sea señalar primero los aspectos esenciales más generales y luego los más particulares, como cuando decimos que el hombre es una substancia viviente sensible racional.

Combinando las dos reglas decimos que la Física comienza planteando el problema más general – y por lo tanto el más simple – que la observación de las cosas nos sugiere.

[1] Aristóteles, *Metafísica*, libro III, capítulo 1.

3º Planteo del primer problema físico

Conviene entonces considerar de la manera más general lo que causa admiración al alma filosófica, planteándolo a manera de problema científico, de tal modo que toda otra cuestión física no sea más que un caso particular de este problema general. Lo dicho parece difícil, pero no lo es tanto: lo proponemos como cosa primera porque, al considerarlo sólo en general, se trata del problema más simple y, por lo tanto, el más fácil de resolver.

A la observación se ofrecen *cosas* y *procesos*; las cosas, en cuanto tales, son permanentes, y los procesos cambiantes. De entre las cosas, unas aparecen más permanentes que otras. Los cuerpos celestes parecen tan inmutables que los antiguos creyeron que eran incorruptibles y eternos; aunque una observación más precisa ha mostrado que no es así. De todos modos, su duración es enormemente superior a los de los cuerpos terrestres. De éstos podemos decir que, en general, mientras más complejos, son menos permanentes: duran más los minerales que los vivientes, y más lo vegetales que los animales. Hay animales cuyas vidas no pasan de una hora. Pero aunque duren mucho o poco, es claro que en el tiempo de su existencia las cosas permanecen siendo lo que son. Lo característico de aquello que llamamos «*cosas*» es tener una manera de ser determinada y *permanente*.

Por otra parte está lo que podemos llamar «*procesos*», cuya característica es ser *cambiantes*. Procesos son el viento, la corriente de un río, el curso de los cuerpos celestes o de un proyectil, el calentamiento o enfriamiento de los cuerpos, la generación o corrupción de las cosas. Estos procesos pueden ser más o menos rápidos, pero lo propio de ellos no es «ser» (*esse*) sino «hacerse» (*fieri*), fluir, pasar.

¿Qué es razonable pensar que predomine, lo cambiante o lo permanente? Es claro que lo permanente. No hace falta pensar mucho para darse cuenta que todos los procesos tienen a las cosas como sujetos, o al menos como términos. El viento y la corriente del río son desplazamientos del aire y del agua, que son cosas permanentes. Lo mismo ocurre con el movimiento de las estrellas o de una piedra, así como con el calentamiento o enfriamiento de un cuerpo. Y si bien no puede decirse que la generación y la corrupción tengan como sujeto a las cosas, las tienen como términos: de llegada o de partida.

Además, no podemos siquiera pensar en lo cambiante sino a la manera de lo permanente. Estamos en la verdad cuando pensamos que las cosas son tal como son en la realidad. Pero si la realidad fuera un puro flujo y cambio, nunca podríamos descansar en verdad ninguna, pues al momento de pensar que el aire está aquí, ya está un poco más allá, y al decir que el agua sobre el fuego está a 60º C, ya está a 60,1º C. De hecho sólo podemos pensar y hablar de los procesos en la medida en que señalamos ciertos aspectos permanentes de los mismos, como por ejemplo la velocidad a que fluye el aire por un mismo lugar, o denominando a modo de una única cosa el proceso completo de un estado a otro, como cuando decimos que el agua está puesta para hervir[1]. La definición y explicación científica de los procesos deberá hacerse, justamente, por sus aspectos permanentes más característicos: el curso del proyectil por la parábola que describe desde el punto de partida al de llegada.

Muy bien, pero ¿qué da lugar, entonces, a la admiración filosófica? ¿Qué es lo que desafía lo que nos parecía razonable y sacude nuestra tranquilidad mental? Esto es, ¿dónde se plantea el problema físico? Hay una experiencia que impacta mucho a los hombres. El que sube a un avión y se ve como parte de un proyectil por los aires, suspira aliviado cuando pone sus pies en tierra firme; el piso es un punto de referencia fundamental para nuestra existencia; de allí que impacte enormemente un terremoto, cuando *nada* queda ya firme y estable. Esta experiencia extraordinaria que turba profundamente a la mayoría de los hombres es semejante a la que sufre el alma filosófica que observa con mayor penetración la ordinaria realidad física. Porque la observación y experimentación científica más precisa que la moderna tecnología ha logrado, descubre justamente que *nada* es firme y estable. El hombre antiguo creía estar quieto en el centro del universo, pero desde Copérnico nos vemos volando en una piedra por el espacio a una velocidad desconocida, porque si bien la podemos medir respecto al sol, no sabemos a qué velocidad gira nuestro sistema solar en torno al centro de la Vía Láctea, y si ésta se pudiera estimar, no sabemos a qué velocidad se mueve nuestra galaxia por el universo. La misma constitución de los cuerpos no parece ofrecer nada firme, pues se ven constituidos de partículas, y partículas de partículas, en constante movimiento. Es más, las últimas teorías científicas van borrando lo poco que podía quedar de fijo en la observación científica, porque la teoría de la relatividad dice que hasta el mismo espacio y tiempo dependen del movimiento, y la mecánica cuántica parece transformar en movimiento ondulatorio a lo que quedaba como sujeto último de los procesos físicos, esto es, las mismas partículas atómicas. ¿Dónde,

---

[1] De allí que la palabra «cosa» pueda también decirse de los procesos, como cuando decimos que el calentamiento del agua es una cierta cosa (una acción del fuego o una pasión del agua). Se traslada este término a todo lo que podemos concebir porque no podemos pensar nada sino bajo cierta razón de permanencia.

entonces, está lo fijo y permanente? ¿Dónde han quedado las «cosas»? ¿Sólo hay procesos sin sujetos ni términos? El físico vive en un perpetuo terremoto y sufre la tentación del viejo Heráclito, quien creía que nada era sino todo procedía: "Lo que está en nosotros es siempre uno y lo mismo: vida y muerte, vigilia y sueño, juventud y vejez, ya que por el cambio esto es aquello, y de nuevo por el cambio aquello es esto. El arreglo más hermoso se parece a un montón de basuras reunido al azar"[1].

Desde el punto de vista de lo cambiante y permanente, el problema físico puede plantearse, entonces, de la siguiente manera: *¿Qué es y dónde está lo permanente en la realidad física, que ciertamente debe fundar y explicar lo cambiante, si a la observación experimental todo aparece como cambiante?*

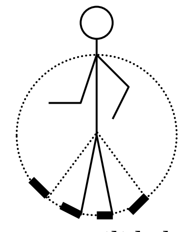
Terminemos este punto haciendo dos advertencias. Un principio de salud mental científica pide no dejar que lo oscuro oscurezca lo claro sino que, por el contrario, lo claro aclare lo oscuro. Aquí lo claro es lo permanente y lo oscuro el cambio, pues, como dijimos, no podemos ni pensar en las cosas sino por sus aspectos permanentes. De manera que no hay que dejarse llevar por la tentación de Heráclito, enloqueciéndose por lo cambiante. Una piedra es una piedra, y a igualdad de impulso describe igual parábola.

Advirtamos, además, que lo cambiante aparece a la observación de los sentidos, mientras que lo permanente es visto por la inteligencia. Esta es una clave importante para llegar a soluciones verdaderas.

Admiración	Quien sabe admirarse de las cosas ordinarias despierta el amor a la sabiduría		
Las cuatro cuestiones	*An sit*	Si es	Pregunta por la *existencia* de la cosa Se responde por la experiencia sensible
	Quid sit	Qué es	Pregunta por la naturaleza de la cosa Se responde con la *definición*
	Quia est	Si es así	Pregunta por la *existencia* de las propiedades Se responde por la experiencia sensible
	Propter quid	Por qué es así	Pregunta por la razón de las propiedades Se responde con las *causas* implicadas en la definición
El cambio y la permanencia	Observación	Las *cosas* son permanentes y los *procesos* son cambiantes	
	Problema	Es evidente que lo permanente funda y explica lo cambiante Pero a la experiencia sensible todo se muestra cambiante	
	Solución	Ver con la *inteligencia* lo permanente para explicar lo cambiante	

4º Inicio de resolución

Un problema general comienza a resolverse con una respuesta general, que luego habrá que determinar más en particular para cada caso. Digamos cuál es la respuesta general al primer problema físico.



Cuando observamos una bicicleta, nos complace entender cómo se ha alcanzado tanta utilidad con tan simples instrumentos. Tres principios físicos entran en juego, la rueda, la palanca y la inercia. La rueda aprovecha la distribución de fuerzas en el caminar del hombre, que se desplaza con el mínimo esfuerzo, y da como una infinitud de continuos pasitos. La longitud de los pedales adecua la fuerza de las piernas en relación a la dificultad del desplazamiento de acuerdo a la proporción de palancas con el radio de la rueda. Y la inercia del cuerpo en velocidad compensa, con un leve giro del manubrio, la tendencia a caer por gravedad de uno u otro lado. La idea de este artefacto se comprende fácilmente, pues lo diseñó el hombre, y la razón de su existencia también, pues su utilidad movió el hombre a fabricarlo.

Pero para la perfección de una bicicleta hacen falta más cosas y para su completa comprensión muchas más. Su estructura pide ser a la vez liviana y rígida, y si bien los metales cumplen estas condiciones, el plomo y el titanio no lo hacen de la misma manera. Además, no terminamos de comprender su funcionamiento sin saber qué es la gravedad y la inercia, que dependen de alguna manera de la corporeidad del ciclista con su bicicleta. Ahora bien, estos otros aspectos no pueden reducirse como a su principio al arte del hombre. ¿A qué otro principio se los debe reducir?

La respuesta general que los hombres han dado a este tipo de cuestiones, es que todos estos aspectos dependen de la «naturaleza» de las cosas. La gravedad y la inercia responden a la naturaleza de los cuerpos; la resistencia a la fractura es propia de la naturaleza de los metales; y el titanio y el plomo tienen cada uno distinta

[1] R. Verneaux, *Textos de los grandes filósofos. Edad Antigua*, Herder, Barcelona 1980, p. 11-12.

naturaleza. Es más, no sólo se atribuye a la naturaleza la quidida y propiedades de las cosas, sino también su existencia. Es la naturaleza la que nos aporta el titanio y el plomo, como también a ella se atribuye la producción de las cosas corporales. Parece entonces que la respuesta general a la pregunta general que habíamos formulado es la siguiente: Lo que hace ser y dejar de ser las cosas, permanecer o cambiar, es la *naturaleza*.

C. La naturaleza y la Ciencia de la naturaleza

Para terminar con esta introducción digamos con mayor precisión qué es la naturaleza, pues entonces podremos precisar también qué es la Física o Ciencia de la naturaleza. Ya estamos aplicando el método científico: hemos respondido al *An sit*, pues todos hablan de una naturaleza de las cosas y muchos se han dedicado a estudiar la ciencia de la naturaleza; ahora corresponde decir *Quid sit*, hallando la definición esencial de ambas cosas. Así quedaremos preparados para ir determinando cuáles son las características de las cosas naturales y de la ciencia que las estudia, respondiendo al *Quia est*, y por qué se dan, el *Propter quid*, última cuestión científica. Que el Alumno no se asuste, pues al comenzar por lo más general, consideramos cosas claras, fáciles de entender.

I. DEFINICIÓN DE NATURALEZA

Antes que todo tengamos en cuenta que a veces se da un mismo nombre a cosas muy diversas, que no responden a la misma definición esencial, pero que tienen cierta semejanza que justifica que se las nombre igual. En Lógica se las llama realidades *análogas*. Así ocurre con la palabra «naturaleza». Pero a nosotros nos interesa el sentido preciso que le da el físico, y de éste sentido buscaremos la definición.

Como se vio en la Lógica, la definición expone los aspectos esenciales de una cosa, empezando por los más genéricos y terminando por los más específicos. Comencemos, entonces, diciendo cuál es el género de «naturaleza», y luego cuál es su diferencia específica.

1º Género de naturaleza

En su aspecto más genérico, la «naturaleza» a la que se refieren los físicos es un «*principio intrínseco*».

La palabra principio viene del latín, formada de *primum caput*, primera cabeza, y así como la cabeza es lo primero en un organismo, así el principio es lo primero en un proceso ordenado. En la bicicleta, el principio del que se sigue todo el ordenamiento de piezas de dicho artefacto, es la idea del artífice que inventó la bicicleta. Pero como vemos, no es un principio intrínseco de la bicicleta, que no es una cosa natural sino artificial. La naturaleza es un principio que está en lo interior de la cosa, de lo que se sigue la manera de ser y de proceder de la realidad natural. La naturaleza del cobre es un principio intrínseco al cobre del que se sigue que sea metal, excelente conductor de la electricidad, capaz de aliarse con tales y tales metales, etc. Y la naturaleza del gato es un principio intrínseco al gato del que se sigue que sea como es y obre como gato.

Podría parecer que al decir esto no hemos progresado gran cosa en el conocimiento de las cosas naturales, pero no se crea. Si hablamos de principio, es porque se distingue el principio de lo principiado, y lo principiado depende del principio y no a la inversa. Vemos que en el cobre y en el gato cambian muchas cosas, pues el cobre a veces conduce la electricidad y a veces no, y el gato a veces ronronea y a veces no. Pues bien, todas estas cosas que cambian tienen como principio la naturaleza, que permanece. Porque mientras el gato es gato, esto es, mientras no cambia su naturaleza y pasa a cadáver de gato, procede en todos sus cambios de manera gatuna; y mientras el cobre es cobre reacciona de manera cuprina. Vemos que algo permanece en las cosas naturales que hace que sean y procedan de la misma manera, y a eso distinto y permanente lo llamamos naturaleza. No es nada tonto haber hecho esta observación.

Como los físicos saben, a este principio intrínseco se lo podría llamar también «causa». La causa, dice Santo Tomás, "es aquello de lo que algo depende según el ser o el hacerse"[1], y la naturaleza es aquello de lo que las cosas naturales dependen en su manera de ser y de proceder. Pero hemos preferido llamarlo «principio», porque el Alumno entiende más bien por causa la causa eficiente, que es sólo una de las cuatro especies de causas. Recuerden que en la Lógica se vio que hay cuatro maneras de dar el «porqué» en las demostraciones: por la materia, por la forma, por el agente y por el fin. Estas son las cuatro especies de causas: la causa material, formal, eficiente

[1] In I Physic. lect. 1, n. 5: "Causae autem dicuntur ex quibus aliqua dependent secundum esse vel fieri".

y final. Pero si bien es fácil entender que el agente sea causa eficiente, no es tan fácil entender cómo son causa la materia, la forma y el fin. Aunque no es tan difícil entender que la materia de la que está hecho un gato explique en parte su manera de ser y de obrar. Sepan, entonces, que la naturaleza es un principio (o causa) intrínseco, y que aunque nosotros la estudiaremos en nuestro curso más bien como causa eficiente intrínseca, la naturaleza es también causa material, formal y final intrínseca.

2º Diferencia específica de naturaleza

Puede haber muchas maneras de principios intrínsecos; puede decirse que la punta de un cable de cobre es principio intrínseco del resto del cable, y que la cabeza es principio intrínseco del gato. Pero cuando los físicos hablan de la naturaleza como principio intrínseco, lo entienden como principio intrínseco «*del movimiento y de la permanencia*». Ésta es la diferencia específica de la definición de naturaleza.

El problema que despertó la admiración del físico fue el cambio de las cosas naturales, y la naturaleza es el nombre que se le dio al principio intrínseco de los cambios naturales de las cosas. Si tomamos la palabra «movimiento» en sentido amplio, podemos decir que todo cambio es movimiento. Así tomamos movimiento en nuestra definición.

Hemos agregado que la naturaleza es principio intrínseco del movimiento *y de la permanencia*. Era necesario porque todo movimiento tiene un término o fin en el que tiende a permanecer, y si la naturaleza es el principio que da razón del movimiento, es también el principio que da razón de la permanencia en el término o fin del movimiento. La naturaleza corpórea de una piedra da razón de que tienda a caer a tierra, y da razón también de que permanezca caída y no se vuelva a levantar. Y la naturaleza del gato es la que da razón de que evolucione de una primera célula a gato entero, y es la que da razón también de que el gato permanezca gato entero toda su vida.

¿Ya tenemos la definición? Todavía no. Los científicos son como los abogados, que tienen temor que alguno malinterprete la letra de sus contratos y los defraude, por lo que agregan artículos de aclaración. Por eso los físicos agregan a la definición tres artículos más de aclaración: ***Naturaleza es el principio (o causa) intrínseco del movimiento y de la permanencia de aquello en lo que es primeramente y por sí, no por accidente***. Ahora sí, pero expliquemos las aclaraciones:

«*De aquello en lo que es*». Algo podría ser principio intrínseco de movimiento de otra cosa, y no de la cosa de la que es principio, y entonces no estaríamos hablando de naturaleza. La naturaleza es principio de la misma cosa que se mueve. Es una sutileza, pero a la hora de dar una definición hay que preocuparse por ser claros, y no dejar lugar a malas interpretaciones.

«*Primeramente*». Que la naturaleza sea principio de movimiento *primeramente* se entiende en dos sentidos.

- Según prioridad *causal*: puede decirse que los músculos son principios del movimiento del gato, pero no son la naturaleza del gato, porque no son principios primeros, sino que son como instrumentos de la naturaleza del gato que obra por medio de ellos. La naturaleza es principio intrínseco primero, el más radical en lo que es el gato y cualquier otra cosa natural.
- Según prioridad *esencial*: como se vio en Lógica, al considerar cómo se definen las cosas, una misma cosa pertenece a una especie, que se incluye en diferentes géneros. La especie gato pertenece al género mamífero, animal, viviente y corpóreo. Cuando un gato se cae de un árbol, su movimiento rectilíneo vertical no responde propiamente a lo que tiene de gato, sino a lo que tiene de corpóreo, pues cae como una piedra por la misma razón por la que caen las piedras. Por eso no conviene decir que este movimiento tiene como principio la naturaleza gatuna, sino la naturaleza corpórea del gato. No es que un gato tenga muchas naturalezas, sino que su naturaleza pertenece a muchos géneros, y conviene advertir a qué aspecto genérico pertenece *primeramente* un movimiento. Ronronear pertenece primeramente a la naturaleza gatuna específica, pero reproducirse y tener gatitos pertenece al gato en cuanto es un ser viviente, pues es algo común a todos los vivientes, por lo que se dice que pertenece primeramente a la naturaleza de los vivientes; y caer pertenece a la naturaleza de las cosas corpóreas.

«*Por sí, no por accidente*». La naturaleza es un principio intrínseco que pertenece a la cosa natural por lo que ella es en sí misma, por sí (*per se*). Es necesario aclararlo porque puede haber principios intrínsecos de movimientos de aquello en lo que es que no sean por sí (*per se*), sino que advengan accidentalmente; por ejemplo, si tomo antibióticos me curo de una enfermedad por un principio intrínseco, pues me los tomé y los tengo dentro. Pero este no es un proceso natural sino artificial, propio del arte de la medicina. Otra cosa es cuando me curo por la reacción natural del sistema inmunológico del cuerpo, que es algo que pertenece por sí al organismo animal y es instrumento de su naturaleza.

Ahora sí tenemos una definición precisa de «naturaleza». Como es muy general, es fácil de entender, salvo la *letra chica* de las aclaraciones, como pasa con los contratos. Por lo mismo parece traer poca luz a nuestro asunto, pero no es así, porque será general, pero *da en el clavo*, es decir, señala lo primero que había que señalar, y nos abre el buen camino a la ciencia. Si hoy hay tanta confusión en la cabeza de los científicos, es porque ha habido ideólogos y sofistas que niegan que las cosas tengan naturaleza, tal como aquí la hemos definido, siendo tan evidente que la tienen. Lo que no es evidente, es en qué consiste propiamente ese principio intrínseco que está en las cosas naturales y explica su manera de ser y proceder. El físico va a trabajar por conocerlo mejor, pero ya lo tenemos ubicado.

II. Definición de Física

Una ciencia se suele denominar ya sea por su sujeto, es decir, por las cosas que estudia; ya sea por su causa, es decir, por el principio o causa que explica su sujeto y la ciencia procura conocer. Así la ciencia que estudia al hombre y sus cosas se suele llamar Antropología, nombre que se le da en razón del sujeto, pues en griego hombre se dice *ántropos*; y se la llama también Psicología, nombre que se le da en razón de la causa, pues la causa principal de que el hombre sea hombre es la *psiquis* o alma del hombre.

La Física toma su nombre no del sujeto, sino de la causa. Los griegos llamaban φύσις (*physis*) a lo que los latinos llamaron *natura*, naturaleza. El nombre de «Física» que se le dio a esta ciencia, entonces, significa *Natural*, es decir, *Ciencia o Filosofía de las cosas naturales o de la naturaleza*. Pero ya vimos que la naturaleza es el principio intrínseco de las realidades que se ofrecen a nuestros sentidos, que el físico debe investigar.

Pero cuando hay que *definir* una ciencia no conviene definirla por su causa explicativa, sino por su sujeto. Porque una definición debe darse por aquellas cosas que son más claras y evidentes que lo definido, y las causas de las cosas suelen ser ocultas, haciéndose necesario una investigación para conocerlas bien. Mientras que las cosas que las ciencias naturales estudian saltan a los sentidos. No es difícil saber qué es un hombre, pero no es nada fácil saber qué es el alma o psiquis del hombre. Por eso si definiéramos la Antropología como «ciencia de la psiquis», seguimos sin saber bien de qué hablamos, pues tendríamos que definir qué es la psiquis. Pero si la definimos como «ciencia del hombre», no hace falta explicar más, y está bien definida. Lo mismo vale para la Física.

No conviene decir que la Física es la ciencia de las cosas naturales, o ciencia de la naturaleza, porque inmediatamente nos veríamos en el problema de tener que explicar qué es la naturaleza, que es algo escondido en las cosas naturales. Tenemos que definir la Física señalando claramente cuál es su sujeto, eso que hemos llamado cosas naturales. Y no es difícil hacerlo: las cosas naturales son aquellas realidades que están sujetas al movimiento, que no tienen un único modo de ser, sino que pueden cambiar. Así son todas las cosas que se ofrecen a nuestros sentidos.

Aristóteles, y tras él Santo Tomás y todos los escolásticos, dicen que el sujeto de la Física es el «ente móvil»: «ente» es todo aquello que es, que existe con cierto modo de ser; y de todas las cosas que son, la Física toma bajo su lupa al ente «móvil», esto es, al ente que se mueve o que es capaz de moverse o cambiar. Dios, entonces, no es una realidad física, porque es inmutable, y tampoco lo son los ángeles. Pero a Dios y a los ángeles no podemos percibirlos con nuestros sentidos. Todas las cosas o entes que percibimos con los sentidos, por el contrario, están siempre sujetas a algún tipo de cambio. Y esas son las que estudia la Física.

La Física, por lo tanto, es la *Ciencia o Filosofía del ente móvil*, de las cosas que pueden cambiar. El «ente móvil» es el sujeto de la Física, que lo estudia justamente en cuanto capaz de movimiento.

Capítulo Segundo
Las cosas naturales y el cambio

Antes de emprender un negocio, todo buen negociante hace un recuento de los capitales y recursos con los que puede contar para llevarlo a buen término. Nosotros queremos emprender el camino de la ciencia para conquistar el tesoro escondido que llamamos «naturaleza», que nos dará el porqué (*propter quid*) de todas las propiedades y procesos de las cosas naturales. Pero para descubrir lo que no sabemos, debemos partir de lo que sabemos. En este segundo capítulo, entonces, haremos el recuento ordenado de lo que se puede saber con evidencia, que es

como el capital que nos permitirá alcanzar y adquirir lo que deseamos saber. Seguiremos siempre el buen método científico, que consiste en considerar las cosas primero en general, para de allí marchar hacia lo más particular.

Dijimos que a la simple observación de la realidad sensible se ofrecen cosas y procesos, cosas que son en cierta medida permanentes y procesos que son diversas maneras de cambios. Analicemos primero las cosas naturales en lo que resulta más evidente, luego los cambios y lo que tenga que ver con ellos.

A. Substancia y accidentes

Una distinción evidente y fundamental al hablar de las cosas naturales es la de substancia y accidentes. Cosas son propiamente las substancias, como un ladrillo, un árbol o un hombre; mientras que los accidentes son más bien aspectos de las cosas, como la porosidad del ladrillo, la altura del árbol o el color del hombre. Aunque la palabra «cosa» da para todo, y también puede decirse que la blancura del hombre es cierta cosa, pero ya es otro sentido muy distinto. Hablemos, entonces, primero de las substancias, y luego consideremos algunos accidentes.

I. LAS SUBSTANCIAS CORPÓREAS

1º Qué es substancia

La palabra «substancia» viene de *sub stare*, dos términos que quieren indicar dos aspectos de la substancia. *Stare* significa estar, pero no de cualquier manera, sino estar derecho, apoyado sobre sus propios pies. Las substancias son las cosas que existen en sí mismas, que tienen la existencia apoyada en sus propios pies, mientras que los accidentes son aspectos que no tienen existencia propia, sino que existen apoyados en las substancias. Como lo blanco, que necesariamente es blanco de algo, de la piel del hombre, mientras que el hombre tiene su propia existencia. Esta es la primera propiedad de las substancias, que no necesita ser demostrada sino sólo señalada con el dedo.

Pero hablamos de *sub*-stancia para indicar otro aspecto, que eso que existe por sí y en sí, está como debajo de multitud de aspectos accidentales. Porque del hombre vemos su color, su figura, oímos cómo habla, le damos la mano y lo tocamos, pero todo esto que se ofrece a los sentidos son aspectos accidentales, que se hace evidente que existen como apoyados en lo que es el hombre, en esa substancia.

Si quisiéramos definir «substancia» estaríamos en un problema, porque ¿a qué género pertenece? Es una noción tan general que no puede hallarse algo más general todavía a lo que pertenezca como a género. Es un género primero. Piense el alumno que si no hubiera géneros primeros, no habría manera de empezar con ninguna definición, pues siempre estaríamos buscando un género superior al que pertenezca la noción que pretendemos definir. Esta es justamente la importancia que tiene esta noción, que es con la que comenzaremos la definición de muchas cosas, como por ejemplo la de hombre: substancia viviente sensible racional.

De todos modos, podemos describir qué se entiende por substancia, recurriendo a la noción más amplia de todas, que es la de «ente»: aquello que es, que puede decirse tanto de las substancias como de los accidentes, más o menos como ocurre con la palabra «cosa». Son nociones amplísimas, de sentidos múltiples que guardan cierta analogía entre ellos. Usando este término, podemos definir la substancia como *aquello que es por sí y no en otro*. Los accidentes, en cambio, no son por sí sino en otro.

2º Existencia y pluralidad de las substancias

Es evidente que las substancias existen como tales y que son múltiples. Un perro y un hombre son por sí y no en otro, y puede uno dejar de existir sin que por eso deje de existir el otro. Son substancias y son distintas. Pero no siempre es evidente que algo sea o no substancia. A simple vista podría pensarse que el sol y la luna son perforaciones en el firmamento por las que pasa la luz que viene de atrás. Como no podemos acercarnos fácilmente para ver mejor estos astros, oírlos y tocarlos, no es fácil decir qué son. Tampoco es fácil decir si son una única substancia o son muchas. Según los astronautas, la luna tiene polvo y piedras separadas, por lo que se ve que es un conjunto de substancias. ¿Y el sol? Difícil decirlo, pues parece una caldera en ebullición. Pero que en muchos casos sea difícil decir si algo es substancia o no, si es una o muchas, no le quita que en muchos otros casos sea evidente, y que la noción de substancia sea clara.

3º Substancia y naturaleza

Si tenemos en cuenta qué es substancia y qué es naturaleza, podemos sacar una pronta pero importante conclusión: *sólo las substancias tienen naturaleza*. Los aspectos accidentales de las cosas naturales tienen un modo de ser que depende evidentemente de la substancia, pues existen en la substancia como en su sujeto, mientras que la substancia existe por sí, teniendo en sí el principio que hace que sea y proceda de un modo particular. De allí que sólo la substancia tenga naturaleza, mientras que los accidentes dependen de la naturaleza de la substancia.

Accidentes	*Ab intrinseco*	*Absolutos*		***Cantidad***
				Cualidad
		Relativo		***Relación***
	Ab extrinseco	*En razón de causa*	*Del agente*	***Acción***
			Del paciente	***Pasión***
		En razón de medida	*De lugar*	***Ubicación***
				Situación
			De tiempo	***Cuando***
		En razón de la naturaleza del hombre		***Posesión***

II. Los accidentes

1º Qué son los accidentes

Llamamos «accidentes» a todos aquellos aspectos que se dan en las cosas pero que no son la cosa misma, esto es, la substancia. Apoyándonos en la definición de substancia, podemos decir que el accidente es *aquello que es en otro como en su sujeto*. La substancia es lo que es por sí y no en otro, mientras que el accidente no es por sí sino en otro. Pero como hay muchas maneras de ser *en otro*, como el vino en la botella y el corazón del avaro en el dinero, agregamos que el accidente está en otro *como en su sujeto*, que es lo mismo que decir como en su substancia, pues la substancia tiene como propio ser a modo de sostén de los accidentes.

2º Los modos de accidentalidad

Los aspectos accidentales de las cosas son infinitos. Pero, como se vio en la Lógica al estudiar las categorías o *Predicamentos*, pueden ordenarse bajo un número finito de géneros supremos. Los accidentes pueden dividirse en dos grandes clases, según que se refieran a algo que proviene de lo interior, *ab intrinseco*, o de lo exterior, *ab extrinseco*:

Ab intrinseco. Hay dos aspectos accidentales que pertenecen absolutamente a lo que la cosa es en sí, sin referencia a ninguna otra cosa. Estos son como los dos accidentes por excelencia: *quantum et quale*, la «cantidad» y la «cualidad». Estos van a merecer en la filosofía una consideración especial, tanto que hasta podría decirse que la substancia, la cantidad y la cualidad son como los sujetos respectivos de las tres ciencias especulativas: la Metafísica, la Matemática y la Física.

A estos dos, se debe agregar un tercer aspecto accidental, también de mucha importancia, pero que no es absolutamente intrínseco, pues se caracteriza o especifica por la referencia a otra cosa: *ad aliquid* o «relación». La Física tiene mucho que decir al respecto, porque, como se verá, la relación se funda en la cantidad (relaciones de mensura) o en la causalidad, pero los problemas que plantea la relación terminan de considerarse en la Metafísica.

Ab extrinseco. Como hemos señalado y es evidente, las cosas no existen solas y aisladas, sino que están en relación con las demás, constituyendo la gran unidad que llamamos mundo. Las cosas que la rodean, entonces, afectan o modifican la substancia en aspectos accidentales cuya naturaleza es semejante a las relaciones, pero con la diferencia de que no nacen *ab intrinseco* sino *ab extrinseco*. Así como las relaciones se fundan en la cantidad o en la causalidad, así también podemos dividir en dos grupos a los accidentes exteriores, según que se funden en la causalidad o en alguna manera de mensura:

- *Con fundamento en la causalidad*. En cuanto a la causalidad, una cosa puede ser activa o pasiva; si es activa, haciendo las veces de agente, hay que tener en cuenta el accidente «acción»; y si es pasiva, haciendo las veces de paciente, el accidente «pasión». Como en Física estudiamos el ente móvil y la movilidad supone el ejercicio de la causalidad, la acción y la pasión constituirán un asunto de primera importancia para nosotros.
- *Con fundamento en cierta medida exterior*. Las relaciones exteriores de mensura pueden referirse al lugar o al tiempo. En cuanto al lugar, se pueden distinguir dos aspectos accidentales: la «ubicación» de la cosa considerada como un todo, o *ubi*; y el orden que puedan tener las partes de la cosa en el lugar, que los escolásticos han llamado *situs* y que podría traducirse por «situación» o «posición». En cuanto al tiempo, cada cosa está afectada por su *quando* o situación temporal. El lugar y el tiempo merecerán una especial consideración en nuestro curso.

A estos cinco accidentes, hay que agregar un modo especial de accidente propio del hombre, la «posesión» o *habitus*. El hombre es el único animal cuya naturaleza no lo dota determinadamente de todo lo que hace a la conservación de la vida. El león tiene boca con cuchillos y patas con tenedores, pero el hombre debe fabricarse estos instrumentos para completar por el arte lo que no tiene por la naturaleza. Esta indeterminación es natural al

hombre, porque por su inteligencia puede cumplir infinidad de oficios diferentes, para lo que necesita diferentes instrumentos. Pero entonces la relación de posesión del hombre respecto a estos instrumentos para la vida, está como inscrita en su naturaleza y constituye un predicamento especial.

B. Cantidad y corporeidad

Las cosas naturales se caracterizan por ser corpóreas, esto es, por ser cuerpos o algo de los cuerpos. Y los cuerpos se ponen de manifiesto en primer lugar por el accidente cantidad. De allí que convenga comenzar el estudio de las cosas naturales por la consideración de la cantidad. Uno de los defectos de la Física moderna es que se refiere a la cantidad como a noción primera y fundamental sin decir qué es, esto es, sin definirla, y sin distinguirla de la substancia. No es éste el defecto principal, porque la cantidad es por sí una realidad suficientemente clara y notoria, pero es un defecto que revela el desconocimiento de la verdadera metodología científica.

I. Qué es la cantidad

1º Las dos especies de la cantidad

La cantidad es un género que tiene dos especies tan diversas que algunos llegan a decir que no tienen nada en común: la *magnitud* y la *multitud*. Magnitud es la longitud de un camino, la superficie de un campo, el volumen de un lago: a todos estos aspectos de las cosas los llamamos cantidad. Multitud, en cambio, se refiere a las repetidas veces que se tiene una cosa, que se mide con el número: diez hombres y mil ladrillos son multitudes, y también las llamamos cantidad.

Son especies de cantidad tan distintas que de cada una, tomada en general – como suele hacer el científico – se tienen ciencias distintas, pues de la multitud se tiene la *aritmética* y de la magnitud la *geometría*. Piense el alumno si no es verdad.

Sin embargo, no dejan de tener algo en común, que no es por capricho de los hombres que se les ha dado el mismo nombre de «cantidad». Por ejemplo, ambos aspectos de las cosas naturales tienen una misma propiedad: son mensurables, es decir, pueden ser medidas por comparación a una unidad. Así como decimos que la multitud es de diez hombres o mil ladrillos, también decimos que la longitud del camino es de diez kilómetros, la extensión del campo de mil hectáreas y el volumen del lago de un millón de litros. Evidentemente algo tienen en común, por lo que podremos dar la definición de cantidad en general, para luego señalar las diferencias específicas que distinguen cada una de estas dos especies.

2º Definición de cantidad

Aclaremos en primer lugar que la cantidad es, como las demás categorías, un género primero, que no tiene un género superior más general y más claro. Podemos decir que es uno de los accidentes, pero la noción de accidente es absolutamente diversa para cada uno de los nueve accidentes que señalamos, por lo que no es un género sino una noción análoga (recuérdese lo que se vio en Lógica).

En segundo lugar señalemos que es uno de los aspectos más claros y evidentes de las cosas naturales, mucho más que la noción de relación o de ubicación temporal. De allí que pudiéramos pasarnos sin dar una definición, mostrando lo que es cantidad con simples ejemplos, como hicimos en el punto anterior. Pero como es una de las nociones básicas de la Física, conviene precisarla lo más posible, pues un buen científico debe ir pisando terreno firme para no tropezar.

En tercer lugar, por el mismo hecho de ser una noción tan primera y tan general, casi nos quedamos sin palabras para explicarla. Por eso su definición, como ocurre con la definición de substancia y de todas las nociones más generales, da la impresión de ser vaga. Pero son utilísimas si se dan bien y señalan los aspectos más característicos de estas realidades.

Para hallar la definición sigamos el método utilizado para definir la substancia: buscamos el género, precisamos la diferencia específica y agregamos la *letra chica*. La cantidad es un accidente, por lo que aquí ya tenemos el género al que pertenece: es *algo que es en otro como en su sujeto*. Y la diferencia específica de la cantidad, que la distingue de todos los demás accidentes, no es difícil de precisar si se piensa un poco (ya lo pensó antes Aristóteles y de eso nos aprovechamos): es la *divisibilidad*. Todo lo que tiene cantidad es divisible en partes.

Ya tenemos la definición, pero si no aclaramos ciertas cosas nos harían tantas objeciones que no nos serviría nuestra definición para gran cosa. Los científicos son gente a veces insoportable. Hay muchas maneras de divisibilidad, y no todas tienen que ver con la cantidad. Un cristiano sabe que el hombre puede dividirse en alma y cuerpo al morir, y no es división de la cantidad, porque el alma no tiene cantidad, sino sólo el cuerpo, que se la guarda toda entera. Pero esta manera de divisibilidad ya está excluida al decir que la cantidad es divisibilidad *de algo que es en otro como en su sujeto*, es decir, de un aspecto accidental, porque alma y cuerpo (como se verá luego) no son aspectos accidentales del hombre ni de ningún ser viviente (todos los seres vivientes tienen alguna especie de alma).

Pero hay otra manera de divisibilidad en partes con cantidad que no son las que estamos teniendo en cuenta, porque el agua, por ejemplo, puede dividirse en oxígeno e hidrógeno, que son los elementos que la componen, y tanto el oxígeno como el hidrógeno tienen cierta cantidad corporal. Pero no son partes de la cantidad del agua, porque ¿dónde está el oxígeno y dónde el hidrógeno en un litro de agua? Las partes cuantitativas del litro de agua son la mitad de arriba y la mitad de abajo, por ejemplo, que pueden señalarse con el dedo, lo que no puede hacerse con esas partes que aparecen luego de la disolución del agua en sus elementos. Ahora sí tenemos que agregar letra chica para evitar esta confusión.

Las partes propiamente cuantitativas, que se siguen de la divisibilidad propia de la cantidad, son aquellas que existen actualmente en la substancia y pueden señalarse con el dedo como ésta y aquélla. Tratemos de expresar todo esto de la manera más breve posible: *La cantidad es el accidente de divisibilidad en partes demostrables*.

Es evidente que al decir demostrables no nos referimos a una demostración silogística, sino a la demostración que se hace con el dedo, por evidencia sensible. Usamos esa palabra refiriéndonos a los adjetivos *demostrativos* «esta» y «aquella» parte, que son los que se usan para las partes de la cantidad.

3º Definición de las especies de cantidad

La diferencia entre la magnitud y la multitud es que las partes de aquellas son *continuas*, y las de ésta son *discretas*, es decir, no continuas. Si tenemos una barra de acero de diez metros de longitud, decimos que los diez metros son la magnitud de la barra, pues las diez partes en que se divide no están separadas, sino que la superficie que divide cada metro del siguiente, pertenece a la vez al metro anterior y al metro siguiente. Pero si tuviéramos diez barras de un metro puestas una a continuación de otra, tendríamos una multitud de diez metros, cuyas partes están actualmente separadas, de modo que la superficie que termina una barra no es la misma que la superficie que comienza la siguiente.

Así podemos definir las dos especies de cantidad simplemente agregando o quitando la diferencia:

- La magnitud es *el accidente de divisibilidad en partes demostrables continuas*.
- La multitud es *el accidente de divisibilidad en partes demostrables no continuas*.

O más simple, la magnitud es la *cantidad continua* y la multitud la *cantidad discreta*.

La cantidad discreta se divide a su vez en subespecies en la medida en que se le agrega o se le quita una parte. Así nueve, diez y once hombres son multitudes específicamente distintas. Como se ve, hay un número indefinido de especies de multitud.

La cantidad continua se divide en subespecies en la medida en que se le agrega o se le quita una dimensión. Así la línea, la superficie y el cuerpo o volumen son tres especies distintas de cantidad continua. Y sólo se dan estas tres especies de magnitud.

II. La mensura como propiedad de la cantidad

1º La mensura en la cantidad discreta

La mensura o medida es una relación de comparación respecto de la unidad que se da primeramente en la multitud o cantidad discreta, y se expresa en el número. Hablamos de una multitud de diez hombres señalando que en ella se da diez veces el hombre, que es la unidad de esa multitud. Y en la multitud de mil ladrillos, la unidad es el ladrillo. Las partes demostrables no continuas de estas cantidades son cada uno de los hombres y cada uno de los ladrillos. La unidad es la esencia común de cada una de esas partes, que se dice por igual de cada una de ellas. Si cada parte fuera de diversa esencia o naturaleza, no constituiría propiamente una multitud cuantitativa. Si veo a Luis, Juan y José, y los tengo en cuenta como personas distintas, no puedo decir que son una multitud: ¿multitud de qué? Sólo puedo hablar de multitud cuando los considero bajo una esencia común: hombre, que es la unidad.

Entonces son tres hombres, más que dos y menos que cuatro. Si me refiriera a Luis, Juan y José, no son más ni menos que nadie, son lo que son.

Como se ve, la unidad no es cantidad discreta, porque no es divisible en partes. Es el principio según el cual se mensura la multitud, por lo que no es ella misma multitud. El alumno puede pensar: ¿pero acaso el uno no es un número, después del cual viene el dos? Cuidado que hay sutilezas: en una multitud de diez hombres, puedo ordenarlos y numerarlos de uno al diez, y así el uno es la primera parte de esa multitud. Pero el primero no es la «unidad», sino que la unidad es el «hombre», que es algo común a los diez. Podemos hablar del número uno en una multitud ordenada, pero no es lo mismo que hablar de la unidad, que es común a todas las partes. No podemos hablar de «un hombre» como de cantidad discreta, pues no tiene divisibilidad (sólo es divisible como cantidad continua). Por eso los escolásticos dicen muchas veces que el primer número es el dos, donde ya hay divisibilidad y es multitud.

Si tomamos la razón de unidad en general, abstrayendo de que sea hombre o ladrillo, pera o naranja, el conjunto ordenado de la unidad y las multitudes subsiguientes: 2, 3, 4, etc., conforman lo que en Matemáticas se denomina «*números naturales*». Se los designa así porque son los que numeran las multitudes tal como se dan en las cosas naturales.

La comparación de la multitud respecto de la unidad, que se expresa en el número, nos permite también comparar diversas multitudes entre sí, siempre y cuando tengan la misma unidad, porque ¿cuál es cantidad mayor, dos sandías o tres melones? Sólo puedo compararlas en cuanto considero una unidad común: es más tres frutas que dos (aunque quizás dos sandías pesan más que tres melones, o son más caras).

La comparación de multitudes permite sumar y restar, multiplicar y dividir cantidades. La resta hace aparecer el concepto de números negativos. Si el que tiene mil naranjas y se pone a vender, vende trescientas, luego quinientas y luego de nuevo trescientas, al sacar las cuentas ve que debe entregar a sus clientes más de lo que tiene. Cien naranjas negativas significan cien naranjas adeudadas, que debe conseguir para entregar a su cliente. No son lo mismo las naranjas naturales que están en el cajón, que las naranjas adeudadas, que existen sólo en posibilidad.

La comparación de multitudes permite también establecer proporciones: dos es a tres como cuatro a seis. De allí se siguen los números fraccionarios, que expresan proporciones, y pueden compararse a la manera de los números naturales, como mayor, menor o igual. ¿Cuál es una proporción mayor, siete a cuatro o doce a siete?[1]

Lo que no puede darse en las cantidades discretas son los números decimales, porque todas se miden por referencia a la unidad, la que no tiene razón de partes.

2º La mensura en la cantidad continua

La razón de mensura se da propia y primeramente en la cantidad discreta, que es donde se da naturalmente la unidad, pero puede trasladarse de modo menos propio y secundario a la cantidad continua, en cuanto se determine de alguna manera una cierta unidad. Si determinamos que la unidad de longitud es el metro, ahora podemos decir que una pared mide dos metros de alto por cinco de ancho. La diferencia principal es que la multitud tiene unidad natural, esto es, determinada por la naturaleza, mientras que la magnitud no, pues hay que determinarla por cierta convención racional. Podríamos decir que la unidad de longitud es el pie, que es más o menos la distancia de un paso breve (unos 30 cm), y entonces la pared mide casi siete pies de alto por casi diecisiete de ancho.

Otra diferencia importante es que, como la cantidad continua es divisible indefinidamente, pues por pequeña que sea la parte en la que se la dividió, siempre puede ser dividida en partes aún más pequeñas, resulta que toda unidad que se determine sigue siendo divisible: al metro podemos dividirlo en cien centímetros y al pie en doce pulgadas. Este es un defecto de la razón de unidad que, como vimos, no se da en la cantidad discreta. Por aquí es donde aparecen los números decimales, que expresan partes de la unidad.

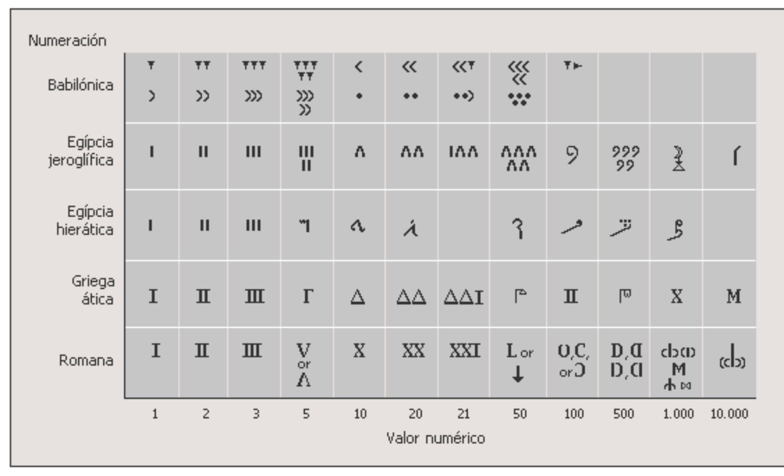
3º Sistemas de numeración

Como el alumno puede darse fácilmente cuenta, en las diversas épocas y lugares se han utilizado muy diversos sistemas de medida, tanto para las cantidades discretas (sistemas de numeración) como para las cantidades continuas, sistemas de medida que dependen de las unidades que se determinen para medir líneas, superficies o volúmenes.

Todos los pueblos antiguos con cierto desarrollo cultural han tenido su sistema numérico. El sistema que ha predominado, pues facilita las operaciones matemáticas, es el «sistema numérico decimal». Parte de una *base* de diez signos diferentes para los números del 0 al 9, y vuelve a utilizar los mismos signos para contar por grupos de diez, de cien, de mil, etc. Algo tiene de natural el número diez, porque utilizamos los dedos de las manos para contar.

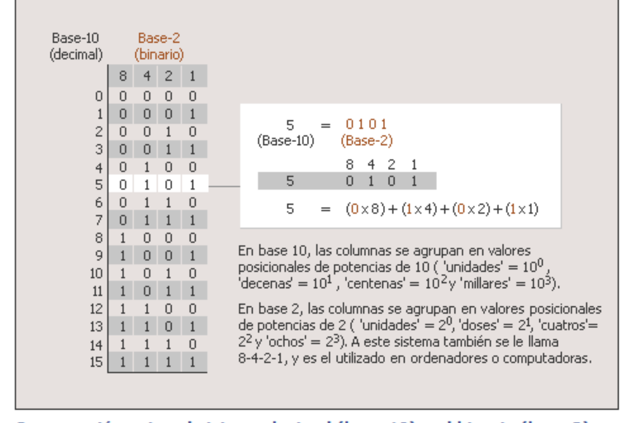
---

[1] Para resolver el problema hay que comparar las proporciones con un denominador común: 4 x 7 = 28. Siete a cuatro es como 49 a 28, mientras que doce a siete es como 48 a 28, menor.



Signos matemáticos de la antigüedad

Con el mismo método pueden crearse sistemas de base diferente, es decir, que en lugar de tener diez signos diferentes, tengan más o menos. En lugar de numerar con los signos numéricos, podríamos numerar con las letras del alfabeto, que son 26 (sin contar la ch y la ñ). Si simbolizamos el cero con la letra A, tenemos que el número Z significa 25, el número ZA significa 25 veces 26 (650) y el número PIN significa: 15 x 26 x 26 + 8 x 26 + 13 (10361). Como se ve, mientras mayor el la base de signos diferentes, se utiliza menor cantidad de cifras para números mayores. En computación se utiliza el sistema binario, que tiene sólo dos signos: tensión eléctrica (signo 1) y no tensión (signo 0). En este sistema, los números crecientes se escriben así: 0; 1; 10; 11; 100; 101; 110; 111; 1000; 1001; 1010; 1011; 1100; 1101; 1110; 1111; etc. Este último número significa: $(2^3) + (2^2) + (2) + 1 = 15$.



Comparación entre el sistema decimal (base 10) y el binario (base 2)

Los ordenadores o computadoras normalmente procesan los números decimales en forma binaria. Por ejemplo, en el sistema decimal codificado en binario (BCD) cada uno de los dígitos decimales del 0 al 9 se codifica con 4 bits. Los cuadros de esta tabla son similares a los grupos de cuatro bits del BCD.

4º Sistemas de medida

En cuanto a los sistemas de medidas continuas, dependen por una parte del sistema numérico que se les aplica, y por otra de las unidades de longitud, superficie y volumen que se determinen, las que a su vez dependen del tamaño de las cosas que se quieran medir. Porque al volumen de un remedio se lo mide por gotas, pero al de un lago mejor se lo compara con piletas de natación. El sistema de unidades tiene que ser conveniente tanto desde el punto de vista *teórico*, pues debe permitir una noción clara de las dimensiones que se miden, y se hace difícil imaginar números muy grandes o muy pequeños; y desde el punto de vista *práctico*, para que se haga fácil dividir en partes las cantidades de que se trate. En lo teórico, es más simple dar solamente unidades de longitud y expresar las unidades de superficie y volumen como un cuadrado o un cubo que tenga esa misma unidad de longitud. Pero no siempre es lo más práctico. La longitud de un metro es como un paso largo, muy práctico para muchas necesidades, pero ya la superficie de un metro cuadrado es más bien grande en el orden práctico, y el volumen que representa un metro cúbico se hace impráctico porque es demasiado grande para la mayoría de los usos humanos. Con un metro cúbico de vino llenamos doscientas damajuanas.

Unidades de medida anglosajonas

	NOMBRE	SÍMBOLO	VALOR
Longitud	Pulgada	in	25,4 mm
	Pie	ft	0,3048 m
	Yarda	yd	0,9144 m
	Milla	mile	1.609,344 m
Superficie	Pulgada cuadrada	in^2	6,4516 cm^2
	Pie cuadrado	ft^2	0,09290306 m^2
	Yarda cuadrada	yd^2	0,836127 m^2
	Milla cuadrada	$mile^2$	2,589988 km^2
	Acre	acre	4.046,856 m^2
Masa	Libra	lb	453,59237 g
	Onza	oz	28,3495 g

En los países anglosajones se conserva un sistema de medidas antiguo, que para distancias pequeñas usa la pulgada, el pie y la yarda. El pie es un paso breve, poco más del tamaño de un pie de hombre; la yarda es un paso largo, equivalente a tres pies; la pulgada equivale al ancho de un dedo pulgar importante, entrando doce pulgadas por pie. El número doce es muy práctico, porque se divide por dos, por tres, por cuatro y por seis. Para las distancias mayores se usa la milla, un poco menos de dos mil yardas[1]. Para las superficies se utiliza el acre, casi media hectárea. Y para los volúmenes el galón, unos cuatro litros (4,5 en Inglaterra y 3,8 en E.E.U.U.).

[1] Exactamente 1760, no sabemos por qué razón; es el resultado de 11 x 8 x 5 x 4. Así son los ingleses.

Pero con la revolución francesa y el triunfo de la diosa Razón, se impuso el *sistema métrico decimal*, que aplica el sistema numérico decimal e impone como única unidad de longitud el metro. Para medidas mayores o menores se usan prefijos que significan múltiplos o submúltiplos de diez: un kilómetro son 10 x 10 x 10 metros, y un centímetro es la décima parte de la décima parte de un metro. Las superficies se medirán en metros cuadrados, aunque también se usó el área (equivalente a un cuadrado de 10 metros de lado), y la hectárea (equivalente a cien áreas, un cuadrado de 100 x 100 metros). Los volúmenes se miden en metros cúbicos o también en litros (equivalente a un cubo de 10 x 10 x 10 centímetros, caben mil litros en un metro cúbico).

Sistema métrico

MEDIDAS LINEALES (LONGITUD)		
1/10 de metro (m)	=	1 decímetro (dm)
1/10 de decímetro	=	1 centímetro (cm)
1/10 de centímetro	=	1 milímetro (mm)
1/1.000 de milímetro	=	1 micrómetro (µm), antiguamente micrón
1/1.000 de micrómetro	=	1 nanómetro (nm)
100 metros	=	1 hectómetro (hm)
10 hectómetros	=	1 kilómetro (km)
1.000 kilómetros	=	1 megámetro (Mm)
MEDIDAS CUADRADAS (SUPERFICIE)		
1 área	=	1 decámetro cuadrado (dam^2)
1 hectárea	=	1 hectómetro cuadrado (hm^2)
MEDIDAS CÚBICAS (VOLUMEN O CAPACIDAD)		
1/10 de litro	=	1 decilitro (dl)
1/1.000 de litros	=	1 mililitro (ml)
1.000 litros	=	1 metro cúbico (m^3)
MASA		
1/1.000 de gramo	=	1 miligramo (mg)
1/1.000 de miligramo	=	1 microgramo (µg)
1.000 gramos	=	1 kilogramo (kg)
1.000 kilogramos	=	1 tonelada (megagramo) (t)

"El metro se definió originalmente como una diezmillonésima parte de la distancia entre el ecuador y el polo norte a lo largo del meridiano de París. Entre 1792 y 1799, esta distancia fue medida parcialmente por científicos franceses. Considerando que la Tierra era una esfera perfecta, estimaron la distancia total y la dividieron entre 10 millones. Más tarde, después de descubrirse que la forma de la Tierra no es esférica, el metro se definió como la distancia entre dos líneas finas trazadas en una barra de aleación de platino e iridio, el metro patrón internacional, conservado en París. Después volvió a definirse a partir de la longitud de onda de la luz rojiza emitida por una fuente de criptón 86. Sin embargo, las medidas de la ciencia moderna requerían una precisión aún mayor, y en 1983 el metro se definió como la longitud del espacio recorrido por la luz en el vacío durante un intervalo de tiempo de 1/299.792.458 de segundo"[1].

PREFIJO	SÍMBOLO	AUMENTO O DISMINUCIÓN DE LA UNIDAD
exa	E	1.000.000.000.000.000.000 (un trillón)
peta	P	1.000.000.000.000.000 (mil billones)
tera	T	1.000.000.000.000 (un billón)
giga	G	1.000.000.000 (mil millones, un millardo)
mega	M	1.000.000 (un millón)
kilo	k	1.000 (un millar, mil)
hecto	h	100 (un centenar, cien)
deca	da	10 (una decena, diez)
deci	d	0,1 (un décimo)
centi	c	0,01 (un centésimo)
mili	m	0,001 (un milésimo)
micro	µ	0,000001 (un millonésimo)
nano	n	0,000000001 (un milmillonésimo)
pico	p	0,000000000001 (un billonésimo)
femto	f	0,000000000000001 (un milbillonésimo)
atto	a	0,000000000000000001 (un trillonésimo)

Estos prefijos pueden agregarse a la mayoría de las unidades métricas para aumentar o disminuir su cuantía. Por ejemplo, un kilómetro es igual a 1.000 metros.

5º Corolario. El sujeto de las Matemáticas por comparación al de la Física

Dijimos que el sujeto de la Física es el «ente móvil», esto es, todas las cosas que existen y son capaces de cambiar, consideradas en cuanto a la aptitud que tienen para el cambio o movimiento. Las Matemáticas, como ya sugerimos, consideran las cosas que son sujeto de la cantidad, tanto continua como discreta, sin considerar qué naturaleza tienen, sino sólo lo que hace a la cantidad:

- En cuanto a las *cantidades discretas*, las Matemáticas no consideran qué especies de unidades puedan tener, si hombres o ladrillos, peras o naranjas, sino que consideran la razón de unidad en general.
- En cuanto a las *cantidades continuas*, no consideran qué substancias les sirven de sujeto, si el volumen es de mármol o de agua, sino que las consideran como extensiones en general.

El sujeto de las Matemáticas, señala Aristóteles, es el «*ens quantum*», el ente cuantitativo, es decir, las cosas que existen sujetas a la cantidad, consideradas solamente en lo que hace a la cantidad.

III. La cantidad y la substancia

Un asunto importante que, aunque no sea todavía el tiempo de resolverlo en profundidad, no podemos dejar de tocar, es el de la distinción entre substancia y cantidad. ¿Son dos aspectos de una idéntica realidad; puede decirse que son cosas realmente distintas; cómo se distinguen? Diremos tres cosas.

[1] Enciclopedia «Encarta».

1º Entre substancia y cantidad hay al menos clara distinción de razón



Substancia y cantidad responden a inquisiciones de la razón muy distintas. Cuando percibimos algo, la pregunta principal es *quid est?*, ¿qué es? Y respondemos señalando la substancia, si es posible por medio de la definición de la cosa: es un oso polar, es un mamífero carnívoro plantígrado comefocas. Pero algo muy distinto es preguntar por la cantidad: *quantum est?* ¿qué cantidad tiene? Se puede responder por la cantidad discreta: es uno o son tres; o por la cantidad continua: ocupa un volumen de 500 litros. Evidentemente la inteligencia considera aspectos muy distintos de la misma cosa.

2º La Física moderna sustituye la substancia por la cantidad

La Física moderna quiere ser estrictamente empírica, no queriendo reconocer la existencia sino de aquello que se ofrece inmediatamente a los sentidos. Y sueña con analizarlo todo con el método descriptivo matemático. Pero la substancia no se ve, ni se oye, ni se toca, sino que se entiende como aquello que subyace bajo lo visible, audible y tangible. La substancia no es objeto inmediato de los sentidos, sino del intelecto. Veo un bulto blanco que gruñe y me abraza, y *entiendo* que es un oso polar. Por lo tanto, el físico moderno es capaz de decirle hasta el ADN del oso, si sobrevive al abrazo, pero no quiere ni hablar de substancia, porque no aparece en sus aparatos.

Además, como quiere medirlo todo y transformarlo en números, para que en sus razonamientos impere el rigor matemático, termina creyendo que la «substancia» de todos sus parámetros, es decir, lo que los sostiene por debajo, es la cantidad. Porque todas las relaciones numéricas tienen como sujeto al accidente cantidad, que el enfoque matemático considera dejando de lado la substancia natural. Si le preguntaran a un físico moderno cuál es la realidad última que está por debajo de todo lo que caracteriza al oso polar, después de pensarlo un poco – porque no están acostumbrados a estos planteos – les diría que es el *espacio*.

No vayan a creer que es ilegítimo utilizar las matemáticas en la Física, pues las cosas naturales tienen cantidad, que es mensurable. El problema está en no tener en cuenta lo que se deja de lado en el enfoque matemático y, peor todavía, en haber renunciado al ejercicio más propio de la inteligencia.

3º Entre substancia y cantidad hay distinción real

La cantidad es el accidente primero en las substancias corporales, como lo son todas aquellas que consideramos en la Física. Todos los demás accidentes, cualidades, relaciones, acciones y pasiones, presuponen la cantidad. Porque los colores se extienden en una superficie, las acciones y pasiones dependen de la distancia, las relaciones se fundan – como dice Santo Tomás – en las acciones o en la cantidad. Y así con todos los demás accidentes, como no es difícil comprobar.

Por ese motivo, las substancias puramente corpóreas, es decir, las que no son vivientes, que son las cosas naturales más pobres e imperfectas, están selladas por la cantidad:

- Cada especie tiene una configuración espacial característica: la de la molécula de hidrógeno es propia y distinta de la de carbono, y la molécula de agua distribuye en especial geometría su átomo de oxígeno y los dos de hidrógeno.
- Todas las cualidades activas y pasivas dependen de la distancia, tanto la fuerza de gravedad como las electromagnéticas.
- No se pueden dividir ni agregar sin afectar de alguna manera la substancia misma de la cosa.

De allí que en este orden de cosas haya tenido mucho éxito el método cuantitativo de la Física moderna. Y de allí también que en estas cosas puramente corporales se haga difícil distinguir claramente la substancia de la cantidad, pues están muy íntimamente asociadas. Pero es muy distinto para los cuerpos con vida.

En las cosas naturales vivientes, sobre todo en los animales, donde la vida es más evidente, es absolutamente claro que la substancia se distingue realmente de la cantidad. Porque es claro que el osito bebé es substancialmente el mismo que cuando crece a oso adulto, y sin embargo cambia enormemente la cantidad. Dos cosas, una de las cuales en realidad permanece y la otra realmente cambia, son distintas con distinción real. Por supuesto que no es fácil decir qué cosa sea la cantidad, pero pregúntenle al que pasó de flaco a gordo o de gordo a flaco si no es algo distinto de su persona. Con delicadeza.

C. Las cualidades naturales

I. Las cualidades en general

1º Las especies de cualidad

En su maravilloso tratado sobre las *Categorías*, Aristóteles distingue cuatro especies de cualidad: 1. Hábito y disposición. 2. Potencia e impotencia. 3. Pasión y cualidad pasible. 4. Forma y figura.

Hábitos y *disposiciones* son, por ejemplo, la salud, el arte de la medicina, la virtud de la humildad, la habilidad futbolística. Los hábitos y disposiciones afectan la substancia de manera favorable o contraria a la naturaleza, ya sea respecto del ser o de la acción, por lo que tienen como propiedad el decirse en bien o en mal. Los ejemplos dados son todos buenos, pero se pueden dar también los contrarios: la enfermedad, el mal hábito de asesinar, el vicio del orgullo, la inhabilidad del patadura.

La *potencia* es un principio o capacidad de obrar o padecer, como por ejemplo la potencia de pensar y querer, de ver y oír, de caminar o correr, de caer a lo más bajo. Con *impotencia* nos referimos a una potencia débil, como la impotencia de pensar bien, o de caminar rengueando.

"Un tercer género de cualidad – dice Aristóteles – es el de las *cualidades pasibles* y de las *afecciones*, como la dulzura, el amargor, la acritud y todas las cosas del mismo orden; así como también el calor, el frío, la blancura, la negrura"[1]. Las llama cualidades pasibles porque frecuentemente aparecen como resultado de una acción, como el calor del calentamiento y la blancura de un lavado, y siempre se perciben como resultantes de alteraciones.

"El cuarto género de cualidad es la *figura* y la *forma* propia de cada cosa, como el triángulo y el cuadrado, y además la rectitud o curvatura, así como toda otra propiedad semejante. Porque, en efecto, una cosa es calificada según cada una de estas determinaciones: se dice tal por ser triangular o cuadrada, y se dice cual por ser recta o curva; y cada cosa se califica según su forma"[2]. Como se ve, estas son cualidades que determinan inmediatamente a la cantidad de una cosa.

2º Definición de cualidad

No es difícil definir la cualidad en general. Es claro que todas las cosas señaladas no son la misma substancia sino accidentes de la substancia, por lo que aquí ya tenemos el género: se trata de una realidad accidental. Y si la substancia es lo que determina a una cosa en su modo fundamental de ser, en su ser substancial, la cualidad la determina en aspectos secundarios, esto es, en su ser accidental. De aquí que podamos dar la siguiente definición: *La cualidad es el determinativo de la substancia en el ser accidental*. Así como lo específico de la cantidad es la divisibilidad, lo específico de la cualidad es la determinación.

En cuanto a las especies de la cualidad, se definen agregando una partícula a modo de diferencia que especifica qué aspecto accidental se determina:

- El hábito o disposición es el determinativo de la substancia *según la naturaleza*.
- La potencia es el determinativo de la substancia *como principio de acción o resistencia*.
- La cualidad pasible o afección es el determinativo de la substancia *según la pasión*.
- La forma o figura es el determinativo de la substancia *según los términos de la cantidad*.

Los hábitos y disposiciones son cualidades propias del ser racional, por lo que se estudian en la Ética o Moral. Las formas y figuras son cualidades de la cantidad, por lo que se consideran más bien en la Geometría. En la Física nos interesan sobre todo las otras dos especies de cualidad.

II. Potencias activas y pasivas

1º Acerca de la definición de potencia

La palabra «potencia» es el abstracto de «potente», el cual viene del latín *potens*, que se compone de *potis* (el que puede), y del verbo *sum, esse, ens* (soy, ser, lo que es o ente), por lo que significa «ser capaz, poder». Potente es aquello capaz de realizar, de sufrir o de resistir una acción. Como la forma abstracta de un nombre significa aquello que hace que lo nombrado merezca el nombre, «potencia» significa el principio que hace potente al potente. De allí la definición que dimos de potencia: *Determinativo de la substancia como principio de acción o resistencia*.

[1] Aristóteles, *Categorías*, 8 b 28.
[2] Aristóteles, *Categorías*, 10 a 11.

¿Por qué no pusimos *principio de acción, pasión o resistencia*, si también se habla de potencia respecto de la aptitud para sufrir una acción, como decimos que la combustibilidad es una potencia de la madera? Porque la potencia pasiva no parece referirse a nada positivo y actual en la cosa, mientras que las cualidades se entienden como una determinación actual y positiva de la substancia. Lo que hay de claramente positivo y actual en la potencia pasiva, es la potencia activa capaz de producirla, pero que es cualidad de otra cosa, no del que sufre la acción sino del que la produce. La combustibilidad de la madera se entiende como una pura posibilidad de que se encienda bajo la acción del fuego, por lo que habla más de una cualidad del fuego que de algo de la madera. En cambio la resistencia a la acción sí se entiende como cualidad positiva y actual.

2º Potencias activas

Observamos empíricamente que una misma substancia natural puede tener muchas acciones u operaciones distintas. El hierro es duro, resiste la tensión, bajo ciertas disposiciones produce efectos eléctricos y magnéticos, estando caliente puede quemar. Una lenteja es capaz de germinar y crecer, de nutrirse de la tierra, de producir más lentejas. Un oso polar es capaz de lo mismo y mucho más, como ver, olfatear, fastidiarse y correr. Y a todo esto el hombre le suma pensar y querer. Como todas estas acciones tienen efectos muy distintos, que se producen en modos y tiempos distintos, tienen que tener en la substancia ciertos principios accidentales distintos para producirlos, que son las *potencias activas*.

Descubrimos fácilmente la existencia de estas potencias, pero no es fácil – y a veces sumamente difícil – determinar la naturaleza de las mismas, qué son y cómo obran. En algunos casos vemos que tienen órganos asociados, como es fácil comprobar que la capacidad de oír está asociada al tímpano del oído. Pero en otros casos no es fácil determinarlo: ¿cuál es el órgano del tacto? ¿y el de la inteligencia? El modo más adecuado para distinguir las potencias activas y definirlas, es por referencia a los actos y efectos que producen. Así es que hablamos de potencia eléctrica, magnética, calórica, nutritiva, generativa, visiva, auditiva, apetitiva, intelectiva, volitiva.

Conviene señalar una diferencia importante que se da en la relación de las potencias activas con sus acciones o efectos. Porque hay potencias que tienen su sujeto propio y producen su acción en otro sujeto, ya sea en otra substancia, o al menos en otra parte de la misma substancia que las tiene a modo de sujeto. La potencia calórica, por ejemplo, siempre calienta otra cosa que donde está ella misma, como la brasa calienta la pava, o el aliento calienta las manos (una parte calienta otra parte de la misma substancia). Hay otras potencias, en cambio, cuya acción y efecto reside en ella misma, o al menos no hay distinción clara entre el sujeto de la potencia y el sujeto de la acción, como ocurre en general con las potencias propias de los vivientes: el sistema digestivo es órgano de la nutrición y se nutre a sí mismo; el oso corre moviéndose a sí mismo; el hombre piensa con el intelecto, pero no se ve que el pensamiento esté en otra cosa, sino en él mismo:

- El primer tipo de acciones se denominan *transeúntes*, porque parecen transitar del sujeto activo al sujeto pasivo.
- El segundo tipo de acciones se denominan *inmanentes*, porque permanecen en (*manent in*) el mismo sujeto activo, que en cierto modo es también pasivo.

3º Potencias pasivas

Observamos también por experiencia que las substancias son capaces de sufrir diversas acciones y adquirir muchas nuevas disposiciones, aunque no cualquier substancia puede sufrir y adquirir cualquier cosa. El hierro puede electrificarse, imantarse y calentarse; pero el cobre no puede imantarse, aunque sí calentarse y conducir la electricidad aún mejor que el hierro; y el teflón (politetrafluoretileno) ni se calienta, ni se imanta, ni conduce la electricidad. A estas aptitudes de las cosas naturales, como la conductividad eléctrica y la capacidad calorífica, las llamamos *potencias pasivas*. Aunque hablemos de ellas a la manera de las potencias activas, es claro que no son lo mismo. No podemos decir sin más que son *cualidades*, porque no son determinativos actuales de las cosas, con realidad positiva, sino puramente posibles. Aunque evidentemente algo hay en las cosas que hace que puedan sufrir ciertas acciones y no puedan sufrir otras. Son posibilidades con cierto fundamento real en las cosas.

Si se piensa bien – tenemos la ventaja de que ya lo hizo Santo Tomás –, se ve que el fundamento de las potencias pasivas tiene dos aspectos, uno positivo y otro negativo. Por una parte debe haber una cierta realidad accidental capaz de sufrir la modificación que implica la acción de la que es pasible (aspecto positivo); y por otra, esa realidad accidental debe ser tenida con cierta debilidad, de manera que el principio agente (activo) triunfe sobre ella para modificarla (aspecto negativo). La electricidad, por ejemplo, parece consistir en cierto desequilibrio de

los electrones de las moléculas que componen una substancia. El fundamento, entonces, de la conductividad eléctrica está, positivamente, en la existencia de los electrones como partes movibles de la substancia, y negativamente, en la facilidad de que sean movidos, facilidad que caracteriza a los metales (pues tienen un electrón móvil en su última *órbita* atómica).

Estas distinciones son claras, pero la realidad natural es compleja, por lo que hay que andarse con cuidado a la hora de aplicarlas. El calor, por ejemplo, parece consistir en cierta agitación de las moléculas de una substancia. La capacidad calorífica, entonces, se funda en la posibilidad de movimiento de las moléculas, y es mayor o menor en cuanto lleve más o menos trabajo ponerlas en movimiento. La capacidad calorífica es una potencia pasiva, el calor es una cualidad pasible, que puede darse en menor o mayor grado, y el calor funda una potencia activa, que es la potencia calórica que tiene algo caliente para calentar. Que el alumno vaya de a poco y no se trastorne.

III. CUALIDADES PASIBLES

1º Acerca de la definición de la tercera especie de cualidad

Hemos definido las cualidades pasibles y afecciones como *determinativos de la substancia según la pasión*. Después de lo dicho acerca de las potencias pasivas estamos en condiciones de entenderlo un poco mejor. Distinguimos entre cualidades pasibles y afecciones en cuanto éstas son transitorias y aquellas permanentes. Las afecciones, como el calor del agua o la electricidad del cobre, son claramente efecto de ciertas pasiones de la substancia, para las que la substancia tenía potencia pasiva, porque el agua es naturalmente fría y el cobre es eléctricamente neutro por naturaleza. Pero hay cualidades pasibles que se tienen por naturaleza, como el oso es por naturaleza blanco, los mamíferos son tibios, el hierro es duro, por lo que no parecen ser resultado de una pasión de dichas substancias. Sin embargo, es fácil ver que esas mismas cualidades resultan de pasiones en otras substancias, como el oso negro americano, ¡que también puede resultar blanco! Y los reptiles pueden llegar a ser tibios – suponemos – si les da fiebre. Se hace suficientemente evidente, entonces, que todas estas cualidades son o pueden ser resultado de una pasión, por lo que conviene definirlas como se las ha definido.

Oso negro americano
El oso negro americano tiene un área de distribución que se extiende por América del Norte, desde Alaska y Canadá hasta las montañas del norte de México. A pesar de su nombre, el color de estos osos puede ser negro, pardo, azulado e incluso totalmente blanco. Se alimentan de frutas, bellotas, pescado, carroña e insectos (dieta omnívora).
Enciclopedia Encarta
Paul A. Souders/Corbis



2º Propiedades de las cualidades pasibles

Tener más y menos. Las cualidades en general tienen una propiedad que sólo se da en esa categoría de realidades: *tienen más y menos*. Más y menos son conceptos que se aplican en primer lugar a la cantidad, primerísimamente a la cantidad discreta, pues tres hombres son más que uno y dos menos que tres; y luego a la cantidad continua, pues una longitud de tres metros es más que una de dos. Pero como las cantidades se especifican por su medida, una cantidad mayor es *otra* cantidad que una menor. Tres es un número específicamente distinto de dos, y nada puede ser *más o menos tres*, o es tres o no es. Y lo mismo hay que decir de la cantidad continua (aunque no es tan patente), pues una longitud de tres metros es otra longitud distinta de la de dos, y no hay longitud que pueda ser *más o menos de tres metros*, o es o no es.

Las cualidades, en cambio, tienen más y menos sin dejar de ser la misma especie de cualidad:

- Algo puede estar más o menos enfermo, saber más o menos medicina, ser más o menos humilde, jugar más o menos al futbol.
- Uno puede pensar, querer, ver y oír más o menos, como caer a lo bajo con más o menos peso.
- Algo puede ser más o menos dulce o amargo, más o menos caliente o frío, más o menos blanco o negro.

En la única especie de cualidad en que no puede darse el más y menos, es en la forma y figura, justamente porque son cualidades de la cantidad, que cambia de especie con el más y menos. Un cuadrado no puede ser más o menos cuadrado, ni un círculo más o menos círculo.

Si se consideran cuidadosamente todas las demás categorías, se puede comprobar que en ninguna otra se da el más y menos. Puede decirse que un hombre es más o menos hombre mirando sus cualidades, pero en cuanto a su substancia, o es hombre o no lo es: la substancia no tiene más y menos. Tampoco lo tienen las relaciones: puedo decir que soy más amigo de uno y menos de otro, pero el más y menos no está propiamente en la relación, sino en las acciones en que se funda (esto es más difícil de entender). En cuanto a la acción y pasión, ocurre algo

semejante a la relación, el más y el menos no se les atribuye por sí mismas, sino en razón de las realidades en las que terminan (lo veremos al estudiar el movimiento).

Como las cualidades tienen más y menos, bajo ciertas condiciones se hace posible atribuirles cierta mensura semejante a la de las magnitudes o cantidades continuas. Pueden establecerse escalas de dulzura, de calor, de blancura; pueden compararse como con números la agudeza del oído o de la vista, así como la aptitud para caer o peso, y la de conducir la electricidad. Pueden numerarse de uno a doce los grados de humildad, como hace San Benito. Pero en todo esto hay que tener cuidado, porque no son cantidades propiamente dichas, y no hay propiamente unidad homogénea capaz de suma y resta. Un grado de calor entre 3º y 4º centígrados no es lo mismo, sino sólo semejante en cierto aspecto, que el grado de calor entre 23º y 24º.

Tener contrarios. Otra propiedad importante, esta vez exclusiva de las cualidades pasibles, es el *tener contrarios*. Al estudiar los postpredicamentos en la Lógica, se consideraron las nociones opuestas, que son aquellas que no pueden predicarse a la vez del mismo sujeto. Allí se vio que hay cuatro clases o especies de opuestos:

- *Por negación*, como ser y no ser, vidente y no vidente.
- *Por privación*, como bueno y malo, vidente y ciego.
- *Por contrariedad*, como blanco y negro, frío y caliente.
- *Por relación*, como padre e hijo, mayor y menor.

La contrariedad presupone una privación, y la privación presupone una negación. Ahora bien, la contrariedad en sentido estricto se da entre dos cosas de un mismo género que guardan *máxima distancia* y puede irse de una a otra de manera *continua*. Porque, como veremos mejor, los contrarios son los extremos de un movimiento, y sólo las cualidades pasibles son el resultado de un movimiento o pasión. Hay contrariedad en sentido estricto entre lo frío y lo caliente, entre lo blanco y lo negro, entre lo pesado y lo liviano, entre lo denso y lo raro (enrarecido). Todas estas son cualidades pasibles.

En los hábitos y disposiciones hay cierto modo de contrariedad, pero no se dan los contrarios en sentido estricto. Porque puede decirse que la soberbia es el contrario de la humildad, y la salud es lo contrario de la enfermedad. Pero no son cosas que pertenezcan al mismo género, pues los hábitos buenos pertenecen al género de las virtudes, mientras que los hábitos malos al de los vicios. Y por lo tanto, tampoco se va de uno a otro de manera continua. El que está menos caliente puede decirse que está más frío, pero el que está menos sano no por eso está más enfermo, ni el que es menos humilde no por eso es más orgulloso. Los santos en el cielo tienen virtudes más o menos perfectas: mayor o menor caridad, humildad, etc., pero no tienen vicios. Menos todavía hay contrariedad en las potencias, salvo que se tome como contrarios lo más o menos perfecto: la mayor o menor capacidad de ver; pero esto no es contrariedad en sentido estricto. Contrariedad en sentido estricto sólo se da en la tercera especie de cualidad. Y esta propiedad es importante a la hora de hablar del movimiento.

3º La primera cualidad pasible de las cosas naturales

Lo primero que constituye las cosas naturales es, evidentemente, su ser substancial, que es aquello que hace hierro al hierro y oso polar al oso polar. En cuanto a los accidentes, si consideramos las cosas naturales en toda su generalidad, como nos aconseja el buen método científico, y por lo tanto no consideramos lo que es propio de los vivientes, sino lo que es común a vivientes y no vivientes, puede decirse con suficiente seguridad que el primer accidente es la *cantidad*: la cantidad continua que hace extensas a las substancias naturales. Por ser extensas y tener volumen, decimos que las cosas naturales son *cuerpos*. La *corporeidad* de las cosas naturales se refiere a su extensión en el espacio, a su tridimensionalidad. Decir que algo es cuerpo y corpóreo, es equivalente a decir que tiene cantidad, que se extiende en el espacio. Se comprueba que la cantidad o corporeidad es el primer accidente de las cosas naturales por el hecho de experiencia de que todas las demás características accidentales que pueden observarse en las cosas naturales presuponen la cantidad.

Pero ¿cuáles son las primeras cualidades que afectan a las cosas naturales? Por lo que acabamos de decir, se hace evidente que las primeras cualidades de las substancias son las formas y figuras de la cantidad, pues la cantidad no puede existir sin términos. De allí que la forma o figura de una cosa sea lo primero por lo que se identifica su ser substancial, desde las substancias más simples, como son las moléculas (que se distinguen por sus tamaños), hasta los más complejos animales. Antes aún que por el color, el oso blanco polar y el oso negro americano se distinguen por su fisonomía.

Ahora bien, después de las cualidades que afectan a la cantidad, ¿cuál es la especie de cualidad primera y más general que afecta a toda cosa natural? No son los hábitos ni las potencias, sino alguna afección o cualidad pasible, porque los hábitos – dijimos – son propios más bien de la más perfecta de las substancias naturales: el hombre, y las potencias son propias de los seres vivientes, mientras que las cosas no vivientes son más bien pasivas en su modo de ser y de obrar.

Por lo que se puede observar, la cualidad pasible primera y más general de las cosas naturales es lo que los físicos llaman *masa*. Puede discutirse si no es la *electricidad*, porque se observan fenómenos electromagnéticos que no manifiestan poseer masa, pero la masa parece ser una cualidad más radical:

- Aparece como una de las propiedades específicas de las substancias más simples, los elementos químicos que, después de su figura o tamaño, se distinguen por su masa corporal.
- Está en el fundamento de dos potencias pasivas muy generales, que son la inercia y la gravedad.

Así como la electricidad es una cualidad pasible que se da por grados entre lo positivo y lo negativo, así también la masa se da por grados entre lo lleno y lo vacío. En la extensión corporal de las cosas naturales, la masa se distribuye de manera heterogénea entre llenos y vacíos, pudiendo variar los llenos y vacíos según diversas afecciones de las substancias. Para atrevernos a dar una definición esencial de esta cualidad debemos progresar un poco más en su estudio. Como las cualidades pasibles son determinaciones de la substancia según la pasión, debemos determinar a qué pasividad responde propia y primeramente (*per se primo*) la masa corporal.

D. El movimiento

La Física es la ciencia que estudia el ente móvil, por lo tanto, al considerar el movimiento, entramos de lleno en nuestro asunto. Siguiendo nuestro método, no pretendemos resolver los intrincados misterios implicados por el movimiento, sino solamente pondremos en claro lo que puede saberse sin mayor esfuerzo: las nociones más evidentes y generales acerca del movimiento. Vamos a distinguir primero la noción de cambio, más amplia, de la de movimiento, más estrecha, haciendo un breve análisis de ambas. Luego veremos qué tiene que ver el movimiento con las categorías acción y pasión, con las que evidentemente se relaciona. Finalmente distinguiremos las diversas especies de movimiento.

I. Cambio y movimiento

1º Análisis del cambio en general

La noción de cambio es muy general. Decimos que hay un cambio en las cosas siempre que se da *cierta novedad entre un antes y un después*, ya sea que lo que no era comienza a ser, o que lo que era deja de ser, o que lo que no tenía un modo de ser lo adquiere, o que lo que tenía un cierto modo de ser lo pierde, o ambos procesos a la vez. Esto que acabamos de decir tan rápido puede ordenarse un poco:

- El cambio puede ser *positivo o negativo*, es decir, puede consistir en un comenzar a ser o en un dejar de ser; o con términos más precisos, podemos decir que puede tratarse de una generación o corrupción.
- El cambio puede ser *total o parcial*, es decir, que implique a todo lo que la cosa natural es, como cuando se genera un osito o se muere el oso viejo; o que implique solamente un aspecto de la cosa natural, como cuando el agua se calienta o enfría. El cambio total afecta a la misma substancia de la cosa, mientras que el cambio parcial sólo a un aspecto accidental.

Combinando estos dos aspectos, tenemos cuatro casos de cambios:

Cambios	**positivos**	**negativos**
totales o substanciales	Generación de una substancia	Corrupción de una substancia
parciales o accidentales	Generación de un accidente	Corrupción de un accidente

Muchas veces se entrecruzan estos cambios, pues a veces la generación de una substancia implica la corrupción de otra, y la corrupción de una implica la generación de otra, como la generación del agua implica la corrupción del oxígeno y el hidrógeno, así como su corrupción supone la generación de estos dos elementos. Y lo mismo puede darse con los cambios accidentales, como cuando el rostro del avergonzado pasa de blanco a rojo: se corrompe el blanco y se genera el rojo.

En los cambios *parciales o accidentales* es claro que hay algo que cambia y algo que permanece, a lo que podemos llamar *sujeto* del cambio, tanto porque en él se da realmente el cambio, como el agua que pasa de fría a caliente, como porque de él se predica el cambio: «el agua cambia». No podemos decir que «el agua fría cambia», porque no es que cambie a ser de otra manera, sino que deja de ser fría; y tampoco podemos decir que «el agua caliente cambia», porque recién la tenemos al final del cambio; lo que cambia es el agua sin más, ni fría ni caliente,

porque era agua cuando estaba fría, y no deja de ser agua cuando está caliente, pero es agua distinta, de allí que digamos que cambia. Y lo que cambia es la temperatura, pues lo frío se corrompe y lo caliente se genera.

En los cambios *totales o substanciales* el asunto es distinto. ¿Hay algo que permanece? Si el cambio es total, como se dijo, parece que no, porque muerto el perro se acabó el perro, la rabia, y todo lo que pertenecía al perro; y cuando nace un cachorrito, todo es nuevo con él. Pero la experiencia muestra que ninguna substancia se hace de nada, y que ninguna substancia se deshace en nada. Si el perro muere de síncope, queda cadáver de perro, si lo mata el tren, queda carne de perro, si lo mata un rayo, queda carbón de perro, si lo mata una bomba atómica, queda al menos vapor de perro. Y la generación de un mineral se hace a partir de sus elementos químicos, como el agua del oxígeno y el hidrógeno, y la de un organismo viviente a partir de los gametos o células germinales. Como enseñan los teólogos, sólo Dios es capaz de crear de la nada (cosa que hizo), y de reducir a la nada alguna cosa (cosa que no hará, pues Dios no se arrepiente de nada). En los cambios substanciales, entonces, no puede señalarse un sujeto del que se predique el cambio, pues la producción de agua a partir de oxígeno e hidrógeno no puede decirse que sea «cambio del agua», pues recién se tiene al final, ni «cambio del oxígeno y del hidrógeno», pues dejan de existir como tales. Lo que podemos decir es que el oxígeno y el hidrógeno son los materiales o materia de los que se hace el agua, y que lo que se corrompe se disuelve en sus materiales o materia.

Si adoptamos la terminología escolástica, podemos resumir nuestro análisis del cambio en el esquema que damos a continuación:

- Llamemos término *a quo* (del cual) y término *ad quem* (al cual) a los dos extremos anterior y posterior del cambio.
- Denominemos *forma* a cualquier aspecto o formalidad accidental de la substancia, ya sea cantidad, cualidad, etc.; y tengamos en cuenta que la ausencia de un aspecto accidental en un sujeto es cierta *privación*.
- Llamemos generación y corrupción *simpliciter* (simplemente dicha) a la generación o corrupción de la substancia, y generación o corrupción *secundum quid* (según algo, según algún aspecto particular) a la generación o corrupción de un aspecto accidental o forma.

Análisis del cambio	**Término *a quo***	**Modo de cambio**	**Término *ad quem***
Cambio substancial	Materia	Generación *simpliciter*	Substancia
	Substancia	Corrupción *simpliciter*	Materia
Cambio accidental	Sujeto con privación	Generación *secundum quid*	Sujeto con forma
	Sujeto con forma	Corrupción *secundum quid*	Sujeto con privación

2º Distinción entre cambio y movimiento

Lo que en un primer momento despertó nuestra admiración filosófica (¿se acuerdan?) no fue propiamente el cambio, así sin más, sino lo que llamamos *procesos* de cambio. Porque nos hallamos con cosas que no *son* propiamente, sino que *se hacen*, que fluyen, que pasan, que están en *movimiento*. El agua en el termo es agua fría, tibia o caliente, pero el agua en la pava al fuego no tiene temperatura fija, porque si decimos que está fría, está dejando de serlo, si tibia, está pasando a caliente, si caliente, está por hervir: no está a ninguna temperatura, sino siempre en aumento de temperatura, en un proceso de cambio al que llamamos propiamente *movimiento*.

Hay cambios que se producen sin un proceso intermedio de movimiento, de manera que se pasa del antes al después sin estados intermedios, instantáneamente. Es verdad que hay algunos procesos que son tan rápidos, que parecen instantáneos, como la iluminación de una pared, pero que si se investigan con cuidado, se descubre que sí implican procesos intermedios. Pero hay otros que, si se consideran bien, se entiende que no pueden implicarlos, como los cambios substanciales. El ser substancial de una cosa – al menos de las vivientes, cuyo ser substancial es más patente – no puede tener estados intermedios: los gametos que se unen no pueden ser un poco osito, más osito, osito completo; o lo son o no lo son, el cambio es instantáneo, sin movimiento propiamente dicho. Lo mismo ocurre con los actos de pensamiento y voluntad: o entiendo o no entiendo, o quiero o no quiero. El movimiento, por el contrario, es un proceso continuo de cambio, de manera que entre el *antes*, o término *a quo*, y el *después*, o término *ad quem*, hay una serie continua de estados intermedios en el que se va produciendo el cambio.

Si prestamos atención, vemos que la palabra «movimiento» se usa tanto para denominar el proceso completo del cambio: el paso del agua fría a caliente es un movimiento del agua, y es un movimiento el traslado en colectivo de La Reja a Moreno; como también se usa para denominar el estado actual de movimiento, como puede

decirse movimiento del agua al calentamiento mientras está en el fuego, y movimiento del colectivo al estar andando. En este caso es un movimiento haciéndose, *in fieri*, en aquel caso es un movimiento hecho y terminado, *in factum esse*.

Como se ve, el movimiento es una especie de cambio. Todo movimiento es cambio, pero no todo cambio es movimiento. La noción de cambio es más amplia, abarca más cosas que la de movimiento.

II. ACCIÓN, PASIÓN Y MOVIMIENTO

1º La acción y la pasión

Entre las categorías o predicamentos accidentales, Aristóteles incluye la acción y la pasión:

- La *acción* es aquello que produce un agente en orden a un efecto: acción es la calefacción que produce un calefactor en orden al calor, es la construcción que realiza el constructor en orden al edificio, es el esculpido o cincelado que hace el escultor en orden a la escultura.
- La *pasión* es aquello que sufre o padece un sujeto o paciente en orden a una nueva forma accidental: pasión es el calentamiento sufrido por lo calentable en orden al calor, es el ordenamiento que se da en los materiales en orden a la construcción, es el corte que sufre el mármol en orden a la escultura.

Si tenemos en cuenta lo que dijimos de las potencias activas y pasivas, es claro que la acción es el acto de la potencia activa, y la pasión el acto de la potencia pasiva.

2º El movimiento es acción y pasión

Las nociones son claras, pero la realidad puede llegar a ser muy compleja. Si consideramos el proceso de la acción, podemos distinguir tres cosas: el agente con su potencia activa, el efecto producido, y la acción como algo intermedio entre el agente y el efecto. En el caso más simple del agua para el mate, tenemos el fuego con su potencia de calentar, el efecto final que es el agua en el termo con el calor adecuado para el mate (¡que no hierva!), y entremedio la acción de calentar del fuego, por la que produjo tal efecto.

Pero hay casos en que tenemos acción sin efecto, y otros en que tenemos efecto sin acción:

- En las acciones inmanentes de pensar y querer tenemos la acción de pensar o querer, pero no parece que haya un efecto distinto de la misma acción, pues lo que se produce es el mismo pensamiento y volición.
- En la generación de un viviente no parece que haya una acción como algo intermedio entre el agente y el efecto, porque la substancia del osito es producida inmediatamente por la substancia del oso pues, como dijimos, su producción es instantánea sin grado intermedio.

Si ahora consideramos el mismo proceso desde el punto de vista de la pasión, también distinguimos tres cosas: el paciente con su potencia pasiva (distinto del agente), la pasión (que proviene del agente), como por ejemplo el calentamiento (producido por el fuego), y el resultado final (efecto del agente), en el caso la nueva cualidad pasible del calor. Y aquí también hay casos extraños, como en los procesos de corrupción, donde no siempre hay presencia de un principio activo sino más bien ausencia, como cuando se muere el perro por paro cardíaco.

Pues bien, sin ponernos a analizar los casos más difíciles en que no hay agente o no se distinguen claramente la acción del efecto, podemos asentar una simple pero importante observación, que se impone por verificación de experiencia: *la acción del agente y la pasión del paciente no son cosa distinta de lo que hemos llamado con precisión movimiento*.

La calefacción del fuego que se ordena producir el calor en el agua no es otra cosa que el movimiento del agua al calor, sólo que se lo tiene en cuenta como proveniente del fuego. Y el calentamiento del agua que se ordena a lo mismo, el calor, es también ese mismo movimiento, sólo que ahora considerado en cuanto residente en el agua. Y lo mismo hay que decir del movimiento de construcción, que es acción en cuanto se lo considera como hecho por el constructor, y es pasión en cuanto se lo considera sufrido por los materiales. Y lo mismo respecto del esculpido, que es acción del escultor y pasión del mármol.

En los cambios de corrupción, en los que puede no haber principio agente, o en los cambios que se dan sin movimiento, como el de la generación de los vivientes y los actos de pensamiento, el análisis se hace más difícil. Pero en este *Curso de Física* empezamos por lo más fácil, estudiando el movimiento.

3º Definición aristotélica de movimiento

Teniendo en cuenta el análisis llevado a cabo, cuando Aristóteles tiene que decir qué es el movimiento, *quid est*, esto es, tiene que definirlo, va a decir sencillamente que el movimiento es *acto*. Es acto del agente, *ab*

agente, y es acto en el paciente, *in patiente*. Es acto del agente que corresponde a la potencia activa del agente, y es acto en el paciente que corresponde a la potencia pasiva del paciente. El calentamiento del agua depende de la potencia activa del agente, pues no es lo mismo calentarla a la llama de una vela que con un soplete de acetileno. Y el calentamiento depende también de la potencia pasiva del paciente, porque no es lo mismo calentar agua helada que agua tibia, ni es lo mismo calentar agua que nafta. El movimiento, entonces, es acto: acción del agente y pasión del paciente. Pertenece, según se lo mire, a ambas categorías de cosas.

Pero la noción de «acto» es muy amplia, pues da a entender muchas cosas. Porque *acto* es todo aquello que actualmente existe y es algo, por oposición a lo que es pura posibilidad, a lo que no existe actualmente sino sólo en posibilidad o en potencia: acto es lo que existe actualmente, potencia es lo que existe en posibilidad. Acto, entonces, puede decirse tanto de las cosas que son actualmente, como de los procesos que actualmente se dan. Y como las cosas son primero que los procesos o movimientos, porque los procesos o movimientos necesitan cosas en las que darse, se suele llamar *acto primero* al que se refiere a las cosas, y *acto segundo* al que se refiere a la acción o movimiento. El movimiento es acto, pero no acto primero sino acto segundo.

Vemos entonces que la noción de acto, dicha del movimiento, se tiene a modo de género con diversas especies: acto primero y acto segundo. Por lo tanto, tenemos que especificarla para distinguirla del acto primero. La diferencia está en que el movimiento o acto segundo es algo inacabado e imperfecto, mientras que la cosa o acto primero es algo acabado y perfecto. Hay movimiento de calentamiento mientras no se ha llegado al calor adecuado para el mate, porque una vez que se llegó, se detiene el movimiento y tenemos el calor, cualidad pasible, que es una cosa, una realidad accidental completa. Hay movimiento de construcción mientras no tenemos el edificio acabado, porque una vez que se lo acabó, se detiene el movimiento y tenemos el edificio, que es una cosa perfecta.

De allí que Aristóteles, para distinguir el acto imperfecto que es movimiento, del acto perfecto que son cosas, le agrega una partícula a la definición: el movimiento es acto *de lo que está en potencia*. Nos dice así que el movimiento es un modo de acto que siempre y necesariamente está orientado a más: es un calor imperfecto que va por más, una edificación incompleta yendo a más. Apenas se retira la pava del fuego o los obreros retiran sus manos de la obra, desaparece el movimiento: el agua queda en lo que es, con la temperatura que alcanzó sin ir a más, y el edificio queda en lo que se hizo, completo o incompleto, pero ya no crece a más, ya ni el agua ni el edificio son acto de lo que está en potencia.

Por supuesto siempre aparecen científicos chicaneros que a todo le buscan defecto. Y alguno dijo: con esa definición se puede decir que el agua en el termo también está en movimiento, porque es *acto* de calor *de lo que está en potencia* de enfriarse, o en potencia de volverse verde mate, o en potencia a mil otras cosas. Y si me respondieran – agregó – que se trata de potencia de aquello mismo de lo que es el acto, esto es, potencia a más calor y no a cualquier cosa, igual resulta que el agua tibia que está en el termo también estaría en movimiento, porque es acto de poco calor de lo que está en potencia a más calor.

Por eso Aristóteles se vio obligado a agregarle *letra chica* a su definición, y puso así: el movimiento es *acto de lo que está en potencia en cuanto está en potencia*. Y basta. Con la partícula «en cuanto está en potencia» quiere recalcar que el movimiento es un modo de acto único y especial que actualiza lo imperfecto (lo que está en potencia) en orden a disminuir esa misma imperfección (en cuanto está en potencia). Es verdad que el lenguaje de Aristóteles es poco explícito, pero al tener que definir nociones tan amplias como el movimiento de cualquier cosa, hay que recurrir a palabras que sean todavía más generales, y estas son las nociones de acto y potencia. Además, Aristóteles era hombre de pocas palabras, porque era buen entendedor que sólo hablaba a buenos entendedores y no pseudocientíficos parlanchines.

III. Las especies de movimiento

1º El movimiento y las categorías

En el movimiento hay tres cosas a tener especialmente en cuenta:

- El agente o motor (motor no es solamente el artefacto que mueve un auto, sino todo aquello que mueve a modo de agente o causa eficiente).
- El paciente o móvil (porque el paciente es el que sufre el movimiento, por lo que el movimiento se predica de él).
- El término o forma (novedad o efecto en que termina el movimiento).

Si consideramos el movimiento en relación al agente o motor, el movimiento pertenece a la categoría *acción*, es una acción que procede del agente.

Si consideramos el movimiento en relación al paciente o móvil, el movimiento pertenece a la categoría *pasión*, es una pasión que se da en el paciente.

Pero si consideramos el movimiento en relación al término o forma, el movimiento puede pertenecer a diversas categorías, como se ve por los ejemplos: el calentamiento es movimiento en la *cualidad*, el viaje en colectivo es movimiento en la *ubicación*, ¿y la construcción?, es el resultado de muchos modos de movimientos: traslado de ladrillos, fragüe del cemento, etc.

Pertenece a estas diversas categorías no de manera propia, sino por *reducción*, es decir, como lo imperfecto se reduce a lo perfecto. Así como se puede decir que el alma humana es algo que pertenece a la especie hombre, porque es parte o principio del hombre, así también puede decirse que el calentamiento pertenece a la especie de cualidad pasible calor, porque es un acto imperfecto que tiende al calor.

2º En qué categorías se da el movimiento

El movimiento, como ya dijimos, no se da en todas las categorías de cosas. Aunque todas las categorías de cosas pueden cambiar, sin embargo, en muchas de ellas no puede darse el movimiento, que es una especie particular de cambio. Consideremos para cada una si se da o no se da el movimiento:

- No se da en la *substancia*, porque la substancia no tiene más y menos, o es o no es, por lo que no puede darse en ella el acto imperfecto.
- Puede darse en la *cantidad*, como cuando el niño crece o cuando el gordo adelgaza.
- Puede darse en la *cualidad*, como cuando el agua se calienta o el rostro enrojece.
- No se da en la *relación*, porque esta es una pura referencia a otro, como la relación de doble o mitad, y puede cambiar porque cambia el otro, sin cambio en la propia realidad, como cuando el hermano mayor era doble de alto que el menor, y éste creció hasta ser igual. La relación del hermano mayor pasó de doble a igual sin que él hubiera disminuido un milímetro en su cantidad. Esto es señal que la relación cambia según sus fundamentos y no responde a la propia noción de movimiento.
- No se da el movimiento en la *acción* y la *pasión*, porque éstas son el mismo movimiento, y no tiene sentido decir que algo se mueve hacia el movimiento.
- Puede darse el movimiento en la *ubicación*, como cuando se viaja en colectivo.
- No se da el movimiento en la *situación*, porque es una manera de relación de parte a parte; sus cambios son el resultado del movimiento de ubicación de las partes.
- No se da el movimiento en el *cuando* o ubicación temporal, porque – como veremos – el tiempo es como una propiedad del movimiento (es una razón semejante a la dada para la acción y pasión).
- No se da, por último, el movimiento en la *posesión*, porque es también una manera de relación.

En conclusión, el movimiento sólo se da en tres categorías: *cantidad, cualidad y ubicación*.

3º El movimiento en la cualidad

Para que haya movimiento no basta que haya cualquier modo de cambio. El movimiento tiene que darse necesariamente entre dos extremos en los que se va de lo imperfecto a lo perfecto de modo gradual y continuo. Hay dos condiciones, entonces, para que se pueda hablar de movimiento:

- *Oposición de privación o contrariedad* entre los extremos del cambio.
- *Continuidad* del proceso de cambio.

Estas dos condiciones se dan de la manera más propia en la cualidad, y no en todas las especies de cualidad, sino sólo en las cualidades pasibles, porque en ellas – como se dijo – se da el más y menos continuo, y sólo en ellas se da la contrariedad. Todo esto habría que explicarlo más, pero conviene ir despacio, empezando por lo más fácil, por lo que ahora conformémonos con dar ejemplos:

- Calor y frío se oponen como contrarios, implicando el calor cierta perfección y el frío cierta privación, y se puede ir de frío a calor y de calor a frío de manera continua por todos los grados intermedios de temperatura. Y lo mismo ocurre entre el blanco y el negro, entre lo denso o lleno y lo raro o vacío, etc. Todas estas son cualidades pasibles en las que se da el movimiento.
- En los hábitos hay cambio pero no propiamente movimiento, porque si bien se da la oposición de privación entre poco humilde y muy humilde (aunque no se da la contrariedad), no se pasa de manera continua por sus grados: los cambios en la virtud o en el vicio se dan por pequeños saltos.

- Tampoco se da movimiento en las potencias, porque no cambian por ellas mismas, sino que cambian las cosas en que se fundan. Si un calefactor se hace más potente, es porque ha cambiado el calor por el que calienta. La potencia de un agente es consecuencia de lo que el agente es.
- Y algo semejante pasa con los cambios de forma y figura: cambian porque cambia la cantidad.

Los movimientos en la cualidad, que son movimientos en las cualidades pasibles, se denominan *alteración*.

4º El movimiento en la cantidad

En la cantidad, dijimos, también se da el movimiento. Si tenemos en cuenta las condiciones del movimiento, es evidente que no se da en la multitud o cantidad discreta sino en la magnitud, única cuyos cambios graduales pueden ser continuos.

Pero hay un problema: si consideramos las magnitudes en sí mismas, no se da en ellas la razón de oposición de privación o contrariedad, por lo que no podemos decir qué cantidad es más perfecta y qué menos perfecta. Sabemos que el vidente tiene una perfección que no tiene el ciego, y que lo blanco y caliente es en sí mismo más perfecto que lo negro y frío. Pero ¿qué es más perfecto, un litro o diez litros? Si se trata de vino, es mejor una damajuana que una botella, pero si se trata de un gas, parece mejor que esté concentrado en un litro y no que esté disperso en diez litros, en lo que pierde presión. Y con respecto al hombre, hay un cierto volumen normal, más allá del cual es obeso y más acá anoréxico.

En la cantidad, entonces, sólo tiene sentido hablar de movimiento como *acto de lo que está en potencia* (*en cuanto está en potencia*) cuando referimos la cantidad a cierta naturaleza, respecto de la cual adquiere la razón de perfecta o imperfecta. Hay perfeccionamiento en la cantidad cuando el niño crece al tamaño del adulto, o cuando el gordinflón se desinfla al tamaño normal. Si se considera el cambio continuo de cantidad sin referencia a nada, por ejemplo una esfera cuyo radio crece a razón de un metro por segundo, pierde la razón propia de movimiento, porque no tiene razón de acto de perfeccionamiento, y no se ve que sea acción de un agente ni pasión de paciente. Si se trata, en cambio, de un globo que se infla, se perfecciona en cuanto al aumento de presión, y supone presencia de un soplete; si se trata de la expansión libre de un gas en el espacio, hay imperfección por disminución de presión y enfriamiento, y supone ausencia del contenedor.

El movimiento de la magnitud imperfecta a la perfecta se denomina *aumento*, y el de la perfecta a la imperfecta, *decremento* o disminución. Como hemos señalado, no siempre la mayor cantidad supone un movimiento de aumento, porque a veces implica imperfección.

5º El movimiento en la ubicación: su debilidad y su importancia

El movimiento se da, por último, en la ubicación, en la medida en que una cosa cambia de lugar. Aquí hay que hacer una observación semejante a la de la cantidad. En el cambio de lugar hay continuidad, porque se mide según la cantidad continua: el colectivo recorre las posiciones referidas a la longitud del camino. Pero no tiene por sí mismo razón de privación o contrariedad, porque si consideramos la ubicación como tal, no tiene por qué ser una mejor y otra peor. Para que haya razón de perfección o imperfección, hay que considerar el lugar en relación también a la naturaleza de las cosas localizadas, como dijimos para la cantidad. El lugar natural de una piedra es lo más próxima a la tierra, pues todos los cuerpos tienden a unirse, por lo que su movimiento de caída se opone como contrario al de subida, pero no tendría razón de contrariedad el desplazamiento de la piedra sin referencia a nada. Y lo mismo el colectivo, pues su movimiento tiene sentido de progreso si se tiene en cuenta que viaja de La Reja a Moreno.

El movimiento según el lugar no ha recibido nombre propio en toda su generalidad, por lo que lo llamaremos de manera compuesta: *movimiento local*. Sólo se han nombrado movimientos locales más particulares, como traslación, rotación, desplazamiento, etc. La causa quizás está en su misma generalidad, pues todo se mueve localmente de alguna manera, y sólo la reflexión filosófica necesita denominar nociones tan generales.

La situación local o ubicación, así como la situación temporal o *quando*, son realidades muy débiles de una cosa, pues son a manera de relaciones de cierta mensura respecto de las demás cosas que la rodean. Aunque puede tener consecuencias muy fuertes, como el estar en el lugar y tiempo en que cae el árbol, o estar unos metros más allá o unos minutos antes. De allí que el movimiento según lugar, del que se sigue – como veremos – el cambio en el tiempo, es en sí mismo el movimiento más débil y más superficial, el que menos profundamente afecta la realidad de las cosas.

Sin embargo se ve por experiencia, y Aristóteles lo reconocía, que *el movimiento local está en el principio de cualquier otro movimiento*. El niño no aumenta si no se lleva el pan a la boca, ni el gordo decrece si no detiene la olla, ni el rostro no enrojece si la sangre no se traslada, ni el perro se muere si el rayo no lo alcanza.

Por estos dos motivos aparentemente contrarios, la *debilidad y principalidad* del movimiento local, conviene estudiarlo en primer lugar:

- Por razón *pedagógica*, mirando al que aprende, conviene empezar el estudio del ente móvil por los cambios más débiles y notorios, pues como aconseja Santo Tomás, "elige entrar por los riachuelos y no de inmediato al mar, porque hay que ir a lo más difícil por lo más fácil"[1].
- Por razón *científica*, mirando lo que se aprende, conviene empezar el estudio del movimiento por los cambios que están en el principio de los demás cambios.

De allí que en este primer *Curso de Física* sólo estudiaremos el cambio local y sus causas. Pero veremos que no es poco lo que se aprende.

IV. CONCLUSIÓN: EL MOVIMIENTO PARA LOS NUEVOS FÍSICOS Y PARA LOS FÍSICOS VERDADEROS

Los físicos modernos sólo se preocupan por la descripción cuantitativa de los diversos movimientos, sin ningún interés ontológico, esto es, sin preguntarse *qué son* las cosas que se mueven, qué perfección o imperfección suponen, y por lo tanto – como veremos mejor al tratar del principio de causalidad –, qué causas implican. De allí que los físicos modernos llamen movimiento a lo que no lo hacen tan rápido los físicos verdaderos, aquellos que respetan el verdadero método científico.

Al físico moderno sólo le preocupa la dirección y velocidad de un movimiento local, o el aumento de temperatura en razón del tiempo para hablar sin más de movimiento. Pero el físico verdadero se pregunta si ese movimiento supone o no cierta actualización, cierto perfeccionamiento de la cosa natural. La definición de movimiento como *acto de lo que está en potencia en cuanto está en potencia* no se aplica a cualquier cambio sin más, pues este acto debe ser acción de un motor y pasión de un móvil. El físico moderno define muy tranquilamente el movimiento de un cuerpo en el espacio a tal velocidad, pero el físico verdadero no queda contento hasta no determinar qué gana o qué pierde ese cuerpo con el cambio de lugar, pues qué sentido tiene hablar de cambio de ubicación, si una ubicación es exactamente lo mismo que otra: no lo pone más cerca o más lejos de nada, no hace variar ninguna influencia. En este caso no tiene sentido buscar el motor: ¿se mueve a sí mismo o es movido por otro? Hace falta referirse a perfección o imperfección ontológica para que esta pregunta adquiera sentido.

No queremos decir con esto que no tenga importancia la descripción cuantitativa de los movimientos, sólo señalamos una diferencia importante de conceptos que hay que tener en cuenta cuando buscamos las causas, cuya determinación procura la verdadera ciencia.

E. El espacio

La Física nueva – decimos – sólo quiere recurrir a la argumentación matemática, por lo que no se interesa por lo que las cosas son, sino sólo por cómo se numeran. Podría decirse que el espacio es el número de la cantidad, y el tiempo es, en definición exacta, el número del movimiento, de allí que estas dos nociones se vuelvan fundamentales para los físicos modernos. Hasta aquí podríamos estar de acuerdo, porque son muy fundamentales y debemos tenerlas en cuenta muy desde el comienzo, como ahora hacemos. Pero el físico moderno se contenta con definir la unidad de espacio y la unidad de tiempo, y habiendo precisado cómo se determina el metro y el segundo, ya le parece que sabe todo lo que necesita sobre ellos. ¡Y en esto no podemos estar de acuerdo! El verdadero científico sabe medir lo que está sujeto a medida, pero antes que nada necesita saber qué es cada cosa, *quid est*, al menos en lo poco que su inteligencia puede penetrar en el modo de ser de lo real. De allí que debamos hacer ahora lo que no hace ningún manual de Física moderno: decir qué es el espacio y qué es el tiempo.

I. LA UBICACIÓN Y EL LUGAR

La *ubicación* de una cosa es aquella realidad accidental que afecta a una cosa natural por el hecho de ocupar un *lugar* determinado. El *movimiento local* de una cosa se refiere a los cambios que sufre según su ubicación al ir

[1] Primero de los consejos de Santo Tomás a Fray Juan, en su precioso opúsculo «Acerca del modo de estudiar», *De modo studendi*.

ocupando diversos lugares (*local* viene de *locus*, *lugar* en latín). La ubicación es realidad intrínseca a la cosa, mientras que el lugar es algo extrínseco, que se puede tomar o dejar, respecto del cual se determina el *ubi*. Para entender qué es la ubicación de una cosa, debemos saber qué es el lugar. Entonces, ¿qué es propiamente el lugar? Aristóteles se explaya en su consideración y Santo Tomás explica cada una de sus palabras. Nosotros nos aprovecharemos de sus sabias reflexiones dando directamente la definición de lugar y refiriendo alguna de sus propiedades.

1º Definición de lugar

Aristóteles define así al lugar: «*Locus est terminus immobilis continentis primus*», el lugar es *el término inmóvil continente primero*. Expliquemos esta definición por partes.

«**Término**». El lugar se refiere a la magnitud de las cosas, esto es, a la extensión de su cantidad continua. Ahora bien, el término de la cantidad es lo que delimita su extensión:

- El término de una recta es el punto, que delimita su longitud.
- El término de un plano es la línea, que delimita su superficie.
- El término de un cuerpo es la superficie, que delimita su volumen.

Las cosas naturales son cuerpos, cuyos *términos* son las superficies que delimitan el volumen que ocupan. En un cubo de mármol, son los seis planos cuadrados en que terminan sus lados.

Cuando nos movemos, dejamos un lugar para ocupar otro, y ese lugar es ocupado por otra cosa, por el aire, por ejemplo. Al hablar de lugar *ocupado*, fácilmente nos imaginamos el *espacio* que ocupamos y que luego ocupa el aire. Pero Aristóteles nos advierte que no hay que imaginar que el lugar es el espacio ocupado, sino que es la *superficie terminal*. Así como la ubicación es algo real en la cosa, pues no da lo mismo estar en un lugar que en otro, también debe ser real el lugar respecto del cual se define la ubicación. Ahora bien, podemos pensar en el espacio corporal nuestro, mayor o menor según lo gordos o flacos que estemos, y pensar a la vez en el espacio ocupado que queda cuando nos movemos. Pero esto es juego de imaginación, porque mientras estamos en el lugar, el único espacio corporal real es el nuestro. Si definiéramos el lugar como el espacio ocupado, no sería cosa real, sino ente de razón de tipo matemático. El lugar no es el espacio ocupado, sino la superficie terminal o, dicho más simplemente, el *término*.

«**Inmóvil**». No basta decir que el lugar es *término*, porque podemos pensar en nuestro término corporal como en la camiseta hecha pellejo en que siempre estamos envueltos, con el que vamos a todos lados. Pero el lugar debe ser definido como el término que dejamos cuando nos movemos, como el vestido que mudamos para ponernos uno nuevo. Por eso *término* entra en la definición de lugar a modo de *género*, que debemos precisar con una diferencia específica. ¿Cuál conviene tomar?

La necesidad de definir el lugar como algo distinto del término mismo de los cuerpos aparece con el movimiento de un cuerpo respecto de los demás cuerpos. En un universo esencialmente congelado, en que cada cuerpo ocupara un lugar por necesidad de naturaleza, no habría por qué distinguir camiseta de vestido, el término propio de lugar, que también sería propio y no mudable. Lo que distingue, entonces, el término que es lugar del término propio del cuerpo, es que éste se mueve con el cuerpo, mientras que aquél es *inmóvil*. Si cada segundo se nos sacara una holografía de nuestra posición corporal[1], tendríamos graficada la sucesiva posición local que vamos tomando y dejando con el tiempo, a manera de una serpiente que dejara continuamente su pellejo – ¡qué fea comparación! –. El lugar de un cuerpo natural, entonces, puede definirse como *el término inmóvil*.

«**Continente**». Ya hemos visto que, desde el pecado original, las definiciones necesitan *letra chica*, tanto para tontos como para maliciosos. Si dejáramos en lo dicho la definición, no faltaría quien haga una objeción: Usted no quiso poner *espacio* porque no es algo real sino imaginación, pero ahora viste las cosas de doble túnica, hablando de una superficie móvil y de otra inmóvil, cuando los cuerpos sólo tienen una única superficie real.

Al que hace esta objeción lo traiciona su imaginación, porque frecuentemente se piensa en la superficie terminal de un cuerpo como en la pintura del mueble o en la piel del animal, que son *parte* del cuerpo. La superficie terminal no es parte, sino, justamente, término o límite, y allí donde termina un cuerpo, allí mismo empieza el cuerpo contiguo. Si determináramos en un sistema de coordenadas la superficie terminal del vino de botella y la superficie interior de la botella de vino – por ejemplo para representarlos en un programa de gráficos tridimensionales CAD (*Computer Aided Design)* –, ¿acaso tendríamos que dar datos distintos para el vino que para la botella?

---

[1] *Holografía*. Técnica fotográfica basada en el empleo de la luz coherente producida por el láser. En la placa fotográfica se impresionan las interferencias causadas por la luz reflejada de un objeto con la luz indirecta. Iluminada, después de revelada, la placa fotográfica con la luz del láser, se forma la imagen tridimensional del objeto original (Diccionario de la Real Academia Española).

La superficie del vino tiene la misma posición que la superficie interior de la botella, sólo que una termina el contenido y otra termina el continente, siendo realmente distintas, pues son términos de cuerpos distintos. Por eso, para lentos y pendencieros, aclaremos que la superficie terminal inmóvil que entendemos como lugar, no es la superficie que termina al cuerpo contenido, que se mueve con él, sino la superficie *continente* o envolvente.

Terminemos de aclarar que tampoco es la superficie continente en cuanto pertenece al cuerpo natural que envuelve el cuerpo en cuestión de quien determinamos el lugar. Porque los cuerpos naturales son móviles, y sus superficies se mueven con ellos. Es el término continente considerado independientemente de los cuerpos continentes, independientemente de la botella para el caso del vino, sino considerado inmóvil, como dijimos. Y si el alumno nos pregunta cómo sabemos qué es lo inmóvil, le respondemos que ese es otro asunto.

«**Primero**». El Filósofo agregó, por último, la partícula *primero*, πρῶτον en griego. Con ella quiso distinguir el lugar *propio* del lugar *común*. Porque podemos decir que el lugar de los alumnos es el aula, o que es la Escuelita del Niño Jesús, o que es La Reja. Pero todos estos son lugares comunes, y cada vez más comunes, de manera que Ustedes pueden moverse en el aula y no dejan de estar en el mismo lugar. Podemos decir que todos los mencionados son lugares, en la medida en que son términos inmóviles continentes (inmóviles al menos respecto de la tierra firme), pero no son el lugar propio de cada uno, porque no son el término continente *primero* o inmediato. El lugar propio y no común de un cuerpo natural es *el término inmóvil continente primero*.

2º Propiedades del lugar

Aristóteles señala cuatro propiedades que todo científico sensato le atribuye al lugar, cuya razón debería manifestar nuestra definición si está bien hecha.

1ª. *El lugar contiene a lo localizado*. El lugar tiene razón de continente, pues es ocupado o desocupado, como el vino a la botella, y nuestra definición lo pone de manifiesto al decir que es el término *continente*.

2ª. *El lugar primero es igual a lo localizado*. Cualquiera entiende que el lugar que una cosa ocupa debe ser igual en extensión a la extensión de la cosa, pero a la hora de definir el lugar no cualquiera sabía expresarlo, porque la propiedad anterior pide que el lugar sea algo distinto de la cosa, pues la contiene, y esta propiedad pide que sea igual. Y nuestra definición lo resuelve al señalar que el lugar es el *término primero*, pues la superficie terminal del continente es exactamente igual a la superficie terminal del contenido, aunque una pertenezca a una cosa y la otra a otra.

3ª. *Todo cuerpo tiene un lugar*. Los cuerpos naturales se caracterizan por estar localizados, sin que falte a ninguno su lugar. Y nuestra definición permite atribuir a cada cuerpo un lugar distinto, sin que pueda haber cuerpos distintos en un mismo lugar. La única cosa corporal a la que no puede atribuirse lugar es a la totalidad del universo corporal que, aunque evidentemente tiene que ser finito y determinado en extensión (pues lo contrario es imposible), no tiene término continente. La totalidad del universo corporal está ¡en ningún lugar! Pero no es contradictorio ni incoherente, porque tampoco tiene sentido hablar de movimiento local del universo como un todo, pues ¿adónde puede ir? Sólo puede moverse según sus partes, y cada parte ocupa un lugar determinado.

4ª. *Todo cuerpo tiene su propio lugar*. Todo científico está persuadido que cada cosa tiene su lugar propio y natural, y siempre anda buscando la explicación de por qué está donde está. Las cosas naturales no son para nada indiferentes al lugar, y la definición de lugar debe permitir esta explicación. Pues bien lo hace la definición que hemos dado. Porque se ve por experiencia que las cosas naturales obran unas sobre otras por contacto, de manera que el lugar, entendido como la superficie continente de una cosa, es aquello por lo que entra en interacción con el resto del universo corporal. De allí que cada cosa tenga su lugar natural, donde su naturaleza está en armonía con la naturaleza de las demás cosas que la rodean. El lugar natural del hombre no es el espacio vacío, ni la atmósfera del planeta Venus, sino la de la Tierra; y no es la cumbre del Everest (casi 9.000 m de altura), ni las fosas Marianas (más de 11.000 m de profundidad), sino la superficie templada de la tierra, pues sólo allí interactúa en armonía con la naturaleza.

II. El espacio y sus sistemas de medición

1º El espacio real

Los físicos modernos, a diferencia de los escolásticos, hablan más de *espacio* que de *lugar*. En el uso común, se llama espacio a muchas cosas, como al espacio exterior fuera de la atmósfera de la tierra, o a la longitud, superficie o volumen que separan u ocupan las cosas. Pero en Física se llama espacio al conjunto de los lugares que pueden ocupar las cosas. Si abstraemos de las especies de substancias que se dan en la realidad, así como de

sus cualidades y demás accidentes, y nos quedamos solamente con la cantidad, la extensión resultante de la totalidad corporal del universo conforma el *espacio real*.

La astronomía nos revela que, en comparación con las dimensiones humanas, el espacio real es inmenso. ¿Tiene extensión estrictamente infinita? No, porque lo infinito es lo que carece de límites, y el espacio es la suma de las cosas naturales corpóreas, que no pueden existir sino con cantidad determinada y en número determinado, por lo que *el espacio real no puede ser infinito*. Así como no puede existir un animal que no sea de una especie determinada, porque el género animal es algo ontológicamente indeterminado que no puede darse en la realidad, porque los animales son hombres, perros o gatos, así tampoco puede existir un cuerpo o una multitud de cuerpos con cantidad indeterminada, ni en magnitud ni en multitud.

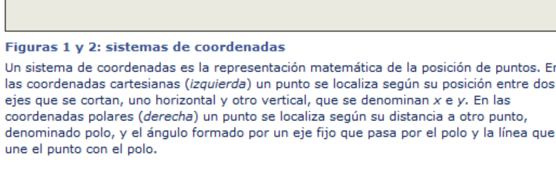
¿Qué forma tiene entonces? Los antiguos hablaban de la *esfera* del universo. Parménides insistía en que la totalidad de lo que es, era esférica y homogénea. Aristóteles lo corrige por doble parte, porque, por un lado, las cosas no son homogéneas, sino que tienen diversos modos de ser, o esencias; y por otro, no todas tienen extensión, sino que hay substancias inmateriales inextensas, a las que llama Inteligencias. Pero el mismo Aristóteles habla del universo corporal como de una gran esfera. Sin embargo, sabía muy bien que sólo era una manera de hablar para referirse a cierta perfección corporal del universo, pues la esfera es el cuerpo geométrico más perfecto, y el único que puede moverse en sí mismo sin salir nunca de su propia extensión. Porque el universo tampoco puede ser estrictamente esférico pues no puede tener una superficie terminal que limite *con nada*. El universo corporal no puede terminar en una pared extensa cuyos diversos puntos terminen líneas perpendiculares en frontera con la nada, porque en la nada no caben diferencias: todos esos puntos terminales deben ser *ningún punto*.

Sí, sabemos que el alumno ya no sabe cómo imaginarse el espacio. Pero por ahora sólo queremos indicarle que el espacio real se las trae.

2º Sistemas de medición del espacio

Hay diversos sistemas numéricos para determinar posiciones y lugares en el espacio, que se suelen llamar *sistemas de coordenadas*. Los dos sistemas más usuales son el *sistema de coordenadas cartesianas* y el *sistema de coordenadas polares*.

Sistema de coordenadas cartesianas. Este sistema imagina el espacio cúbico, con un centro que reúne tres ejes perpendiculares, numerados según cierta unidad de longitud, en metros por ejemplo. Y puede determinar la posición de cualquier punto por tres números: (x, y, z), referidos a cada uno de los ejes, según cierto orden preestablecido. Así como se determinan puntos, se pueden determinar líneas, superficies y volúmenes. Todo esto se enseña en *Geometría analítica*.

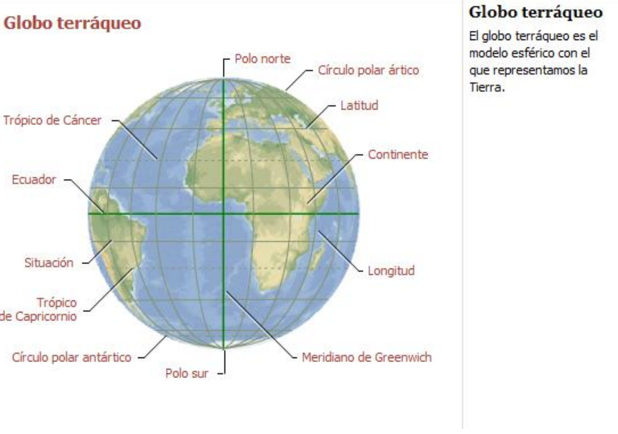


Figuras 1 y 2: sistemas de coordenadas

Un sistema de coordenadas es la representación matemática de la posición de puntos. En las coordenadas cartesianas (*izquierda*) un punto se localiza según su posición entre dos ejes que se cortan, uno horizontal y otro vertical, que se denominan *x* e *y*. En las coordenadas polares (*derecha*) un punto se localiza según su distancia a otro punto, denominado polo, y el ángulo formado por un eje fijo que pasa por el polo y la línea que une el punto con el polo.

Sistema de coordenadas polares. Este sistema imagina el espacio esférico, y la distancia de cualquier punto al centro queda determinada por dos ángulos, horizontal y vertical, y una distancia a la que se llama *radio*: (α, β, r). Éste es el sistema que se usa en geodesia, es decir, en la medición de la Tierra: el ángulo horizontal está dado por la *longitud*, el vertical por la *latitud*, y en cuanto al radio, se mide la altura o profundidad respecto del radio normal de la superficie de los océanos.

Como hemos sugerido, estos sistemas no pueden servir para representar la totalidad del espacio real, que no puede ser ni esférico ni cúbico.



Globo terráqueo

El globo terráqueo es el modelo esférico con el que representamos la Tierra.

III. Espacio vacío y espacio lleno

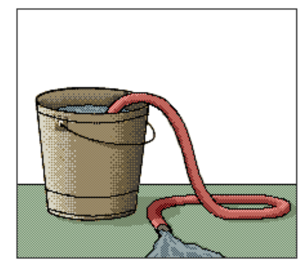
1º Un poco de historia

Un asunto de la mayor importancia es la noción de *espacio vacío*, que tanto dio y da que hablar, y en torno a la cual hay tanta confusión. El físico moderno entiende el vacío como una extensión sin masa corporal, pero como no se ha formado en la discusión propiamente científica, que es *quiditativa*, es decir, que procura establecer *lo que*

son las cosas, *quid sunt*, fácilmente termina hablando de más. El asunto es saber si existe el vacío entendido como extensión carente de toda substancia corporal. No es lo mismo la masa, que es una cualidad pasible, que la substancia.

Ya los primeros físicos presocráticos discutieron acerca de la existencia del vacío así entendido. Parménides sostuvo con firmeza que todo está lleno de ser, pues lo que no es nada es, y no puede poner ninguna distancia. Pero como pensó al ser homogéneo, negó la posibilidad misma del cambio y del movimiento: no puede haber novedad en el ser, porque si se dice que lo nuevo viene del ser, ya es y no es nuevo; y si se dice que viene del no ser, del no ser nada puede venir porque no es. Por lo que el ser es eterno e inmóvil. Pero Parménides envejeció y murió, quedando seguramente convencido de que sí se daba el cambio.

Como Parménides había negado el cambio con el argumento de que todo estaba lleno de ser, Demócrito defendió la posibilidad del movimiento sosteniendo que se da el ser, eterno e inmóvil, pero que también existe el no ser, que es el vacío, que penetra el ser y lo divide en átomos, partículas indivisibles, esféricas e inmutables de ser. Aristóteles, en cambio, también defendió la existencia del cambio, pero lo explicó señalando que hay diversos modos de ser, algunos inmutables y otros no. Y negó la posibilidad del vacío por ser noción contradictoria, pues supone la existencia de cantidad sostenida en nada, sin ninguna substancia que le haga de sujeto. También negó el argumento de Demócrito, que creía necesario el vacío para explicar el movimiento de los átomos, señalando Aristóteles que, por el contrario, al poner el vacío se hacía imposible el movimiento, pues la absoluta falta de resistencia del vacío haría infinito cualquier movimiento. El problema estuvo en que el profundo análisis aristotélico fue expresado con observaciones físicas todavía deficientes, creyendo, por ejemplo, que todo está lleno de algo semejante al aire. Pero más allá de estas deficiencias, las intuiciones de Aristóteles eran y siguen siendo válidas.



La escolástica medieval, que cultivó el verdadero método científico, siguió fiel al aristotelismo y negó, con sus mismas razones, la existencia del vacío. Algunas experiencias físicas, como las del efecto «sifón», llevaron a que se imponga como un principio físico el *horror vacui*: la naturaleza tiene horror al vacío, y obra para impedirlo[1]. Y como acostumbran los sabios, este principio se extendió por analogía del ámbito físico a otros dominios, ético, político y teológico. El principio físico del *horror al vacío* siguió siendo aceptado hasta los siglos XVI y XVII, hasta que nuevas experiencias impusieron otra explicación de los fenómenos en que se apoyaba.

Al trabajar en las minas se había observado que no se podía bombear agua más allá de los 10 metros. Partiendo de esta observación, los experimentos de Torriceli, Pascal y Boyle mostraron que la fuerza que subía el agua bombeada no era la imposibilidad de un cierto vacío, sino la presión atmosférica. Aparecieron entonces los primeros barómetros y bombas de vacío.

El que termina aparentemente de explicar estos fenómenos es Newton, con sus leyes sobre la atracción de la gravedad. Se enciende entonces una gran polémica en torno a la existencia del vacío. Descartes había identificado extensión y corporeidad, aunque sin aceptar la distinción escolástica entre cantidad y substancia, y muchos seguían su posición antivacuista, como Hobbes, Spinoza y Leibniz. Los newtonianos, en cambio, identificando cuerpo con masa, que era el parámetro que entraba en las leyes de inercia y gravedad, comenzaron a defender la existencia de un vacío corporal. Leibniz, por ejemplo, sostuvo un gran debate con el newtoniano Clarke, entre 1715 y 1716, en el que se tocó el asunto del vacío.

El triunfo de la física newtoniana trajo consigo la convicción de que, donde no hay masa, hay espacio vacío, y por espacio vacío tiende a entenderse la ausencia de toda substancia corporal. A esto se agregó la resurrección del atomismo de Demócrito, promovido por Gassendi, que entiende los átomos como corpúsculos que se mueven en el vacío. Pero, repitamos, estas opiniones se asientan en científicos que carecen del verdadero método de pensar.

2º El espacio vacío

La Física o Ciencia de la naturaleza es una mirada de inteligencia sobre la realidad sensible, por lo que se nutre de la experiencia. Aristóteles observó las cosas lo más y mejor que pudo, y nunca habría despreciado una observación superior. El verdadero físico no puede dejar de lado las agudísimas observaciones de la física moderna, ayudadas por los enormes recursos de las nuevas técnicas. Pero no debe renunciar a la luz de la inteligencia, y en esto Aristóteles sigue sin superior.

No tiene sentido hablar de una extensión sin sujeto extenso, o en lenguaje escolástico, de cantidad sin substancia. Para el (verdadero) físico este es un principio de evidencia empírica, pues se hace ridículo sostener que

[1] Con un tubo como J invertida puede vaciarse un tanque, elevando el agua por encima de su borde. Se entendía que el flujo de agua no se interrumpía por no poder producirse «vacío», aunque luego se entendió mejor que ocurría por la presión atmosférica.

la Tierra y la Luna están separadas por 400.000 km de nada. La defensa de estos principios escapa a la Física y pertenece a la Metafísica. El metafísico demuestra que puede existir la substancia sin la cantidad, pero no la cantidad sin la substancia. Pero esto no hace falta para el que guarda el sentido común.

La experiencia muestra también que las cualidades que se observan en las diferentes partes extensas son muy diversas, y manifiestan a veces claramente diferencias substanciales. Una de las primeras cualidades, y por lo que parece la más fundamental, es lo que se ha dado en llamar *masa* corporal. Decimos que parece ser fundamental porque, de una manera o de otra, está en el origen de todos los fenómenos físicos. Pues bien, esta cualidad se halla más o menos concentrada en diversos lugares, concentración que se denomina *densidad*. Hay regiones más densas, otras menos densas, y hay regiones en que no se manifiesta la masa. Como la masa es expresión de cierto vigor corporal de la substancia, puede hablarse de un espacio más o menos *lleno* al que manifiesta mayor o menor densidad, y podemos hablar de *vacío* absoluto al espacio en que no se manifiesta en absoluto esta cualidad. En esto no hay problema, pero no se diga que no hay substancia donde se está observando la extensión de la cantidad.

Aún más. El espacio vacío (que llamamos así porque no tiene masa) manifiesta muchas otras cualidades que ponen en evidencia se realidad corporal (que así le decimos porque la noción de cuerpo sigue más a la extensión que a la masa). El espacio en torno a la Tierra tiene cualidad gravitatoria, electromagnética, lumínica, etc. ¿Dónde se pretende que tengan asiento todos estos accidentes, sino en la realidad substancial que lo ocupa?

Lo que debería terminar de confirmar al físico la realidad substancial del espacio vacío es que en las mismas substancias corporales, aun en las vivientes, donde la continuidad y unidad substancial es tan evidente, muestran una heterogeneidad análoga a la del orden cósmico en el orden microscópico. Porque muchas experiencias permiten observar que la densidad se concentra en espacios casi puntuales, con espacios sin masa relativamente muy amplios. No puede negarse la unidad substancial de las moléculas, ni de las estructuras cristalinas, a veces tan uniformes y rígidas. Es evidente que el espacio que separa los átomos, así como los núcleos y electrones, es parte de la misma substancia, aunque no manifieste tener masa. ¿Acaso no es sorprendente la realidad física? Pero que las sorpresas de lo novedoso no nos hagan renunciar a la tranquila amistad con lo conocido.

A veces se llama «éter» a lo que *llena* el espacio *vacío* (*llena* en cuanto a la cantidad, y está *vacío* en cuanto a la masa). Usar este sustantivo tiene la ventaja de manifestar que el espacio tiene substancia. Pero quizás no convenga la palabra, porque no es claro si se trata de una substancia separada de los cuerpos másicos presentes, o está en dependencia de ellos, a modo de cierta emanación. Como todas sus cualidades parecen depender de alguna manera de la masa, cabe sospechar que no pueda existir el espacio vacío sino en dependencia de sus partes llenas. Así lo sugiere, en primer lugar, el vacío interatómico de los cuerpos conocidos, y también (con menor seguridad) las teorías cosmológicas que hacen depender la misma geometría espacial de la densidad. Esto último queda por estudiar, y por supuesto no en un simple curso inicial de Física. Nosotros no usaremos el término *éter*, que ya toma cierto partido, sino que nos quedaremos con la expresión *espacio vacío*, donde *espacio* implica cantidad, y por lo tanto sujeto substancial, y *vacío* significa cero densidad, privación de masa, que es sólo una cualidad pasible contraria a la masa, como el frío es contrario al calor y el negro al blanco. Lo principal, entonces, que aquí queremos señalar, es que no debe entenderse el espacio vacío como cantidad sin substancia, pues no tiene sentido. Pero veamos un asunto más.

3º La inmovilidad del espacio vacío

Para tratar del movimiento local tuvimos que definir el lugar, y en la definición no hubo otra que referirnos a lo inmóvil, pues el lugar es el *término inmóvil*. Pero determinar lo que está absolutamente inmóvil en el universo corporal se presenta, para los físicos modernos, como uno de los problemas más arduos y, para algunos, imposible de solucionar. La *teoría de la relatividad*, de Albert Einstein, parte del presupuesto que es físicamente imposible determinar la inmovilidad.

Sin embargo, las observaciones físicas acerca del movimiento, si se toman en su ingenua evidencia inicial, nos obligan a considerar que el espacio vacío es inmóvil, y que todo movimiento debe referirse a él. Así se sigue de la leyes de gravedad, electromagnetismo y, sobre todo, del mismo movimiento inercial.

Consideremos dos cuerpos aislados en el vacío, la Tierra y la Luna, por ejemplo, en un universo en el que a Dios no se le ocurrió crear nada más. Si el espacio vacío no fuera nada, como muchos piensan, sino sólo una extensión en la que se mueven los cuerpos, su presencia no tendría que intervenir en la explicación del movimiento relativo de dichos dos cuerpos. Supongamos que comienzan quietos uno respecto del otro. Como, por ley de gravedad, los cuerpos se atraen en proporción directa al producto de las masas y en proporción inversa al cuadrado de la distancia, deberían acelerarse uno hacia el otro hasta chocar. Pero, ¿y si están girando ambos, de tal manera

que siempre se muestran la misma cara el uno respecto del otro? Si giran despacio, se acercan con menor aceleración, pues la fuerza de atracción gravitatoria es disminuida por la fuerza centrífuga del giro. Si giran rápido, se alejan, por el triunfo de la fuerza centrífuga. Si giran a la velocidad angular justa, se produce un equilibrio de fuerzas y quedan inmóviles uno respecto del otro. Muy bien, así lo dicen las leyes de la Física. Pero ¿giran respecto de qué? Porque el lunático y el terráqueo que se están mirando acercarse, separarse o mantenerse a igual distancia, según los casos, no pueden apreciar ningún otro movimiento relativo entre dichos cuerpos. El giro, tan decisivo respecto al comportamiento relativo de ambos cuerpos, sólo tiene sentido definirlo respecto del espacio vacío: éste es el marco de referencia *inmóvil* respecto del cual debe explicarse el movimiento inercial-gravitatorio de los cuerpos. Si están quietos *respecto del espacio vacío*, se atraen según la ley de la gravedad, si giran *respecto del espacio vacío*, depende de la velocidad del giro para que el movimiento sea menor, nulo o contrario. Es evidente que *el espacio vacío es el marco de referencia inmóvil* que permite definir los movimientos de los demás cuerpos.

Ahora supongamos dos cuerpos con carga eléctrica positiva puestos en el espacio. Según las leyes físicas, van a sentir una fuerza repulsiva que tiende a separarlos. Pero si ambos cuerpos cargados se ponen en igual movimiento según dos líneas paralelas, las leyes del electromagnetismo predicen que aparecerá una fuerza magnética que tiende a atraerlos (pues la electricidad en movimiento genera un campo magnético). Mientras más rápidamente se mueven, la fuerza magnética de atracción es mayor, y contrarresta la repulsión eléctrica, por lo que la velocidad a la que se apartan es menor. Si se aplican las leyes del electromagnetismo, se puede observar que, a la velocidad de la luz, se compensan las fuerzas y los dos cuerpos ya no se separarían. Muy bien, pero ¿respecto de qué se mueven? Evidentemente, *respecto del espacio vacío*. Aquí también el espacio vacío es el marco de referencia *inmóvil* respecto del cual se mide el movimiento de los cuerpos y los campos magnéticos resultantes.

La misma conservación inercial del movimiento de los cuerpos no se podría explicar sin una acción y reacción sobre el medio en el cual se mueven, a la manera como un surfista se movería a sí mismo si provocara con su empuje una ola en el mar (los físicos modernos ya no ven esto porque al renunciar al análisis quiditativo de las cosas, han renunciado también al verdadero análisis causal). Pero si bien se puede pensar en pasajero que surfea en la pileta de un trasatlántico, y que el trasatlántico entero surfea en el mar, no se puede llevar esta explicación al infinito, y hay que detenerse en un primero medio que está inmóvil. Y este parece ser el espacio vacío, que es donde se desplazan todas las vibraciones, inerciales, gravitatorias, electromagnéticas, etc.

Un argumento *a contrario* que apoya lo dicho, es que la *teoría de la relatividad*, que parte del presupuesto que no hay marco de referencia preferencial (cuando todas las leyes físicas ponen al vacío como tal), llega inmediatamente a conclusiones contradictorias, como que lo que es simultáneo para un observador, no lo es para otro: las cosas coexisten o no, y si uno dice que sí y otro que uno, uno sólo tiene razón.

Sabemos que, para el que está formado en la Física nueva, todo esto suena muy nuevo. Pero no tendría que ser así. Es consecuencia de un método científico muy parcial, que dejó de lado el método verdadero y pleno.

F. El tiempo

Para la Física moderna, que ansía reducirse con exclusividad al método matemático, el espacio y el tiempo son sus parámetros fundamentales, porque son inmediatamente numerables, y entran así en la descripción numérica (no propiamente definición, que las ciencias modernas no buscan) de casi todas sus nociones y leyes. Y aquí tenemos la principal renguera de esta nueva ciencia, porque si bien la existencia y naturaleza del espacio es bastante evidente (aunque no en todos sus aspectos, como vimos), no ocurre lo mismo con el tiempo, cuya misma existencia es ya problemática: todas las nociones y leyes físicas pretenden ser explicadas partiendo de una noción que no se tiene para nada clara. Lo oscuro no se aclara con lo oscuro. Para no caer en lo mismo, aclaremos *qué es el tiempo* antes de seguir adelante.

I. ¿QUÉ ES EL TIEMPO?

1º Existencia del tiempo

El tiempo parece tener tres partes, pasado, presente y futuro. El pasado ya fue, por lo que sólo existe en sus consecuencias sobre el presente. El futuro todavía no es, por lo que sólo existe en sus posibilidades en el presente. Sólo existe el presente. Pero el presente, ¿puede decirse que es *parte* del tiempo?

Podemos hablar de las partes de un cuerpo, como la cabeza, el tronco y los miembros. Son verdaderas partes, pues son del mismo género que el todo, pues si el cuerpo tiene cierto volumen, también lo tienen sus partes. Si el tiempo se mide en años, el pasado es parte, pues ha durado 4.000 años, o 14 mil millones de años, pero duró un tiempo. Y el futuro durará también un tiempo, 1.000 años, mil millones. Pero el presente, ¿cuánto dura?

Un *instante*. El instante no es un segundo, como a veces se dice: «Espérame un instante, espérame un segundo», pues del segundo – miren su reloj – vemos el comienzo: tic, y luego el fin: tac, que han sido dos instantes. ¿El instante mide entonces medio segundo? Pero una buena máquina de fotos puede sacar cien fotos en un segundo, y cada foto ha sido sacada en un instante distinto. Hay que decir que en un segundo caben tantos instantes como puntos caben en un milímetro. Y en un milímetro caben… infinitos puntos.

Lo que ocurre es que el instante no es propiamente una *parte* del tiempo, sino un *término* o límite del tiempo: es el límite en que termina el tiempo pasado y comienza el tiempo futuro. Al hablar del lugar, dijimos que la superficie es término del volumen y no parte, pues un volumen no se constituye sumando superficies (pues una superficie tiene cero volumen), y que la línea es término de la superficie y no parte, y que el punto es término de la línea y no parte, pues tampoco se forma una línea sumando puntos, sino sumando longitudes, y el punto no tiene longitud. Pues bien, de manera semejante, el instante no es propiamente una parte de tiempo, que dure aunque sea muy poquito, sino que es término y límite del tiempo.

Aquí podría saltar un alumno avispado y decirnos: ¡Entonces el tiempo no existe! Porque aquello que se divide en partes y ninguna de ellas existe, no existe; y el tiempo no tiene tres sino dos partes, el pasado y el futuro, y ninguna existe. No vayas tan rápido. Existe el instante presente. Concedo que no es una existencia perfecta, pero no es una pura inexistencia. Si representáramos el tiempo en el eje horizontal, numerado según las horas, los días y los años, y en el eje vertical todo lo que ha ocurrido en cada tiempo en cualquier lugar del universo – como se representa en historia la línea del tiempo –, la existencia estaría representada por una línea vertical que se mueve a velocidad constante, haciendo pasar las cosas del futuro al pasado.

A fin de cuentas, ¿piensas que el movimiento existe, o eres terco como Parménides? Cuando fuiste de La Reja a Moreno, ¿no recorriste todo el trayecto? Y sin embargo, nunca estuviste más que en un punto a la vez de toda esa longitud, pues cuando te movías a otro, dejabas el anterior y todavía no estabas en el próximo. Como ves, la existencia del tiempo es tan imperfecta como la existencia del movimiento, que no existe como un todo, sino momento por momento. Y aquí ya tenemos una pista para decir qué es el tiempo: el tiempo tiene que ver con el movimiento.

2º El tiempo y el movimiento

Algunos antiguos dijeron que el tiempo era el movimiento del cielo, siendo el día una revolución completa de la esfera celeste. Y si a algún contemporáneo le preguntamos qué es el día, nos responde que dos giros completos de la aguja petisa y gorda del reloj. El tiempo no es el movimiento, pero si quitáramos el movimiento, desaparecería el tiempo. Si todo se congela y se detiene, ya no tiene sentido hablar de paso del tiempo.

Hay que decir entonces que el tiempo es *algo del movimiento*. **En primer lugar**, hay que aclarar que el tiempo no es una *percepción* del movimiento. Es verdad que pareciera a veces que cada persona tiene su tiempo, pues hay lentos para los que una hora es como tres de la persona normal, y hay rápidos que en quince minutos hacen lo que otro en una hora. Y a uno mismo a veces se le pasa el tiempo volando, y otras no pasa nunca. Pero todo esto es una cuestión psicológica, y el tiempo real no depende del temperamento ni del humor.

En segundo lugar, el tiempo no es una propiedad de cada movimiento particular, porque entonces habría tantos tiempos como movimientos: el tiempo de la esfera celeste, el de la aguja del reloj, el del colectivo a Moreno. El tiempo permite comparar los movimientos, diciendo si son rápidos o lentos. El tiempo, entonces, tiene que ser algo de un *movimiento primero*, que de alguna manera esté en el origen y regule todos los demás movimientos. Sólo así puede hablarse de un único tiempo para todos los movimientos. Como dijimos – más por intuición que

por demostración –, el tipo de movimiento que está en el origen de los demás es el movimiento local. El asunto es determinar a qué puede llamarse *primer movimiento local*.

El movimiento, como vimos, resulta de la acción de un motor sobre un móvil. Por lo tanto, el primer movimiento será el que resulte del primer motor y del primer móvil. Para Aristóteles, el primer movimiento era el de la primera esfera, movida inmediatamente por el Primer Motor inmóvil, Dios, lo que explicaba que su movimiento fuera perfectamente constante, siendo a su vez motor de las demás esferas. Pero no parece haber esferas. El primer móvil parece ser el cuerpo másico que se mueve respecto del espacio vacío, que se ve como lo inmóvil. Y el primer movimiento parece ser el inercial-gravitatorio de lo que no tiene influencia exterior, que en su primer origen no puede haber sido dado sino por el Primer Motor (asunto a demostrar). Pero aún sin verificar esto, el movimiento inercial-gravitatorio parece responder a los principios (pasivos) del movimiento más primeros, dependientes más inmediatamente de la masa, primera cualidad (volveremos sobre esto). Es verdad que para determinar exactamente el movimiento inercial-gravitatorio de los cuerpos habría que considerar el universo como un todo, del que cada cuerpo celeste es parte, pues sólo así estamos ciertos y seguros de que no hay influencia exterior. Pero esto escapa a nuestra posibilidad. A nosotros no nos queda otra que considerar el tiempo como algo del movimiento del sistema solar, suponiendo con todo derecho que la influencia del resto de la galaxia sobre nuestro sistema es despreciable.

Habiendo determinado que el tiempo es algo del movimiento local, nos queda decir, **en tercer y último lugar**, *según qué aspecto* se refiere el tiempo al movimiento. El movimiento local se determina según la magnitud recorrida de lugar en lugar, de manera continua, entre un comienzo o lugar «*a quo*» y un término o lugar «*ad quem*». Como la magnitud recorrida es cantidad continua, que tiene un orden de partes según los términos *a quo* y *ad quem*, el movimiento local adquiere cierta manera de continuidad según el orden de anterior y posterior, en cuanto el móvil pasa de lugar en lugar según la longitud. Pues bien, como el tiempo también es algo continuo, evidentemente se refiere al movimiento local según el orden de anterioridad y posterioridad de sus partes, que es de donde el movimiento toma continuidad. Como es notorio, no se percibe el tiempo si no se considera el movimiento según su razón de anterior y posterior, *secundum prius et posterius*.

Cuando definimos el movimiento como *el acto de lo que está en potencia según que está en potencia*, consideramos al movimiento en su estado actual, puntual, no considerado en cierta duración sino en un instante. El tiempo se refiere al movimiento no de esta manera, no como acto de lo que está en potencia, sino según su sucesión de lo anterior a lo posterior, según el transcurso.

3º Definición de tiempo

Ya estamos en condiciones de definir lo que es el tiempo. Hagamos un recuento de lo dicho: El tiempo se refiere al movimiento según el antes y el después, *prius et posterius* que el movimiento adquiere por referencia a la cantidad continua. Y se refiere propia e inmediatamente a un primer movimiento local, y por medio de él se refiere a los demás. Pues bien, así como la magnitud puede numerarse por comparación con cierta unidad, así también el primer movimiento local, en cuanto recorre la magnitud según cierto orden de anterior y posterior, puede numerarse por comparación con cierto período o movimiento unitario. Y este número es lo que llamamos tiempo. El tiempo, entonces, no es otra cosa que **el número del movimiento según lo anterior y posterior**, *numerus motus secundum prius et posterius*.

Cuando hablamos de tres horas o cinco días, numeramos el movimiento de la tierra en el espacio vacío por relación a una unidad: un giro completo o día, una veinticuatroava parte de ciclo u hora. Si hablamos de tres meses o cinco años, ahora lo hacemos respecto del movimiento de la tierra en torno al sol. Como vemos, el tiempo es la numeración del primer movimiento según su secuencia de anterior a posterior, considerada respecto de cierta magnitud, giros o partes de giro.

Cuando hablemos, entonces, de un viaje que duró veinte minutos, de La Reja a Moreno, comparamos el movimiento del colectivo con el movimiento de la tierra, numerado por el tiempo. De esa manera, por comparación, la numeración del primer movimiento puede trasladarse a todo otro movimiento.

II. Sistemas de medición del tiempo

1º División de los sistemas de medición del tiempo

Según los diversos movimientos que se tomen como primeros, habrá diversos sistemas de medición del tiempo. Como dijimos, la observación de las cosas hace pensar que el movimiento primero es el *movimiento inercial* de un cuerpo en el espacio vacío. Llamamos movimiento inercial a aquel que el cuerpo hace por sí mismo, sin

influencia alguna exterior. En este movimiento, una misma magnitud es recorrida del mismo modo, pues se aplica constantemente una misma y única causa, que es la del cuerpo que se mueve a sí mismo (ya lo estudiaremos mejor). Hablando en general, este movimiento puede tomar dos formas, de *traslación* y de *rotación*. En el movimiento de traslación, el movimiento puede ser numerado respecto a cierta unidad de longitud recorrida, y en el movimiento de rotación respecto a cierto ángulo o giro completo.

Yendo a lo particular, los hombres hemos sido puestos en el cuerpo que llamamos Tierra, que tiene un movimiento de rotación sobre sí mismo, y un movimiento de traslación, y ambos pueden usarse para medir el tiempo. La dificultad está en fijar puntos de referencia para medir las unidades de magnitud recorrida, pues ¿cómo saber la distancia, por ejemplo, que recorre la tierra en el espacio quieto? En cuanto a la rotación de la tierra, el punto de referencia natural es el sol, de donde tomamos el *tiempo solar*. Y en cuanto al movimiento de traslación, el punto de referencia es las estrellas, y lo podemos llamar *tiempo sidéreo*.

Veremos que en cada caso se presentan algunos problemas de precisión, por lo que los científicos han buscado otros movimientos para tomarlos como patrones temporales de mayor precisión, como es el caso de los *relojes atómicos*. Aunque estos movimientos no puedan considerarse físicamente primeros, diremos que, aunque lo normal es medir los movimientos por el tiempo, a veces es práctico y legítimo medir los tiempos por algún movimiento. Consideremos, entonces, estos cuatro sistemas de medición del tiempo.

2º El tiempo solar

El sistema más natural para el hombre de medir el tiempo es el que se basa en la rotación de la tierra y toma como punto de referencia al sol. Visto desde la tierra, parece ser el sol quien gira, por lo que fue tomado como la gran manecilla del reloj humano. La división más significativa respecto del sol es en dos: día y noche, divididos por el amanecer y atardecer. Así cuenta los días el Génesis: “Dijo Dios: «Haya luz», y hubo luz. Vio Dios que la luz estaba bien, y apartó Dios la luz de la oscuridad; y llamó Dios a la luz «día», y a la oscuridad la llamó «noche». Y atardeció y amaneció: día primero” (Gén 1, 3-5). Justamente la palabra «día» viene del latín *dies*, que viene de *Divus*, Dios como autor de la luz. Esta palabra, entonces, puede significar un giro completo, por ejemplo de atardecer a atardecer, o sólo medio giro, el tiempo de luz, desde el amanecer al atardecer.

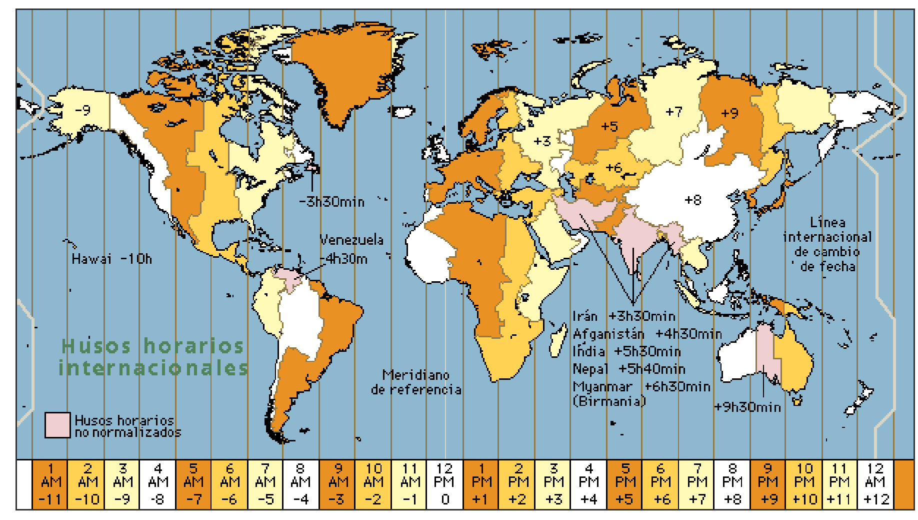
Cada una de estas mitades de giro fue convenientemente dividida en mitad y mitad de mitad, es decir, en cuatro partes cada una. Los romanos, por ejemplo, divídían la noche en cuatro *vigilias*, que eran los turnos de los que hacían la guardia militar: “Dichosos los siervos a quienes el señor, al venir, encuentre despiertos: yo os aseguro que se ceñirá, los hará ponerse a la mesa y, yendo de uno a otro, les servirá. Que venga en la *segunda vigilia* [de 9 a 12] o en la *tercera* [de 12 a 3], si los encuentra así, ¡dichosos ellos!” (Lc 12, 37-38). Los judíos, y luego los cristianos, tenían un tiempo de oración al comienzo de cada una de estas horas del día. Como, además, cada uno de estos intervalos se divídían en tres partes (inicial, medio y final), dando doce horas para el día, estas cuatro oraciones se llamaban *de la hora prima, tercia, sexta y nona*. Así el día quedó dividido en 24 horas, 12 de luz y doce de oscuridad.

La hora se dividió en 60 minutos, número que se forma de dividir en dos (mitad y mitad), luego en tres (inicio, medio y fin) y luego en diez (lo que se cuenta con los dedos). Y el minuto se dividió en 60 segundos. El segundo es más o menos un pulso del corazón. En una hora, entonces, hay 3.600 segundos (60 x 60). Que el alumno recuerde este número, pues horas y segundos son dos medidas muy frecuentes en física, y muchas veces hay que pasar de una a otra.

Este modo tan práctico de medir el tiempo tiene sus inconvenientes, sobre todo para los viajeros, porque la posición del sol en el cielo es distinta para los diversos lugares de la tierra. Como ésta mide unos 40.000 km de diámetro, cada 1.700 km en dirección este-oeste hay una diferencia de 1 hora, cada 28 km hay diferencia de 1 minuto y cada cuatro cuadras y media habría diferencia de 1 segundo. Cuando en Moreno son las 8:00 h en punto, en Liniers son las 8:01 h y en Once las 8:02 h. ¿Será por eso que nuestro bus escolar llega siempre tarde? Si nuestro chofer acelerara a 1.700 km/h, iría siempre a la misma hora (a la misma posición relativa del sol).

Para minimizar estos inconvenientes, en 1883 hubo un acuerdo internacional para dividir la tierra en 27 husos horarios, de manera que cada 15º de longitud (360º/24) se tuviera la misma hora, sin diferencia de minutos. Además, para no tener cambios horarios dentro de un mismo país, se adecuaron los husos horarios a los límites políticos. El huso medio tiene como centro al meridiano de Greenwich (donde está el Observatorio Real de Inglaterra), que es el meridiano 0, y crece hacia el este y decrece hacia el oeste. Termina siendo curioso que en el meridiano opuesto del pacífico (marcado en el mapa con línea irregular) hay cambio no sólo de hora sino de día: al pasar del huso +12 al -11 se pasa ¡al día siguiente!

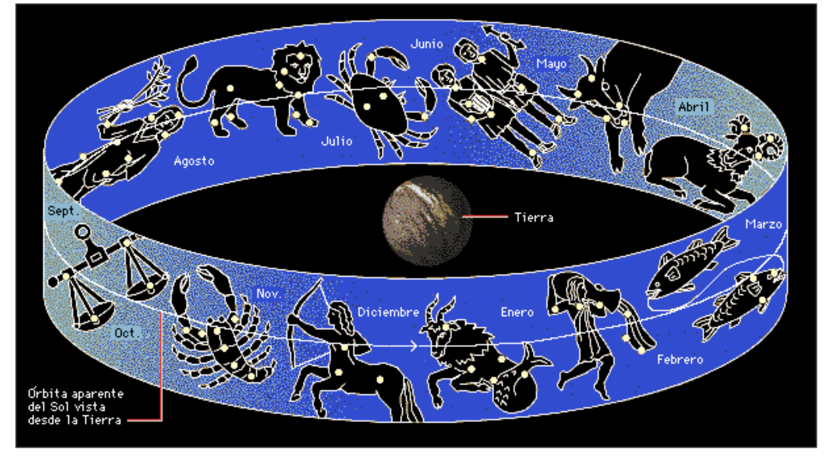
Otro inconveniente es que, como el sol no está siempre a la misa distancia de la tierra, pues ésta no describe una circunferencia perfecta al girar en torno a él durante el año, hay épocas del año en que el día total es un poco más corto y otras en que es más largo, con diferencias notables de hasta 16 minutos. Cuando en el siglo XVII se hicieron relojes de gran precisión, se vio la necesidad de determinar un *tiempo solar medio*, de manera que el atraso del sol respecto de los buenos relojes se compensara con el adelanto de los otros momentos del año.



Husos horarios

3º El tiempo sidéreo

El movimiento de rotación de la tierra es en realidad un movimiento muy complejo, porque no es un cuerpo completamente rígido ni perfectamente esférico, y porque su movimiento se combina con el de la luna. De todo esto resulta que hay variaciones de 1 o 2 segundos anuales en la rotación de la tierra. Además, por efecto principalmente de las mareas, se produce un cierto frenado de la tierra, haciéndose el día una milésima de segundo más largo cada cien años (no mucho, ¿no?). Por todo esto, sobre todo para los cálculos astronómicos, que necesitan de gran precisión, se hizo conveniente apoyarse más bien en el movimiento de traslación de la tierra en torno al sol, tomando como punto de referencia no el sol, sino las estrellas lejanas, que aparecen como una gran esfera inmóvil que gira lentamente en el cielo en el transcurso del año, de manera que cada media noche vemos una constelación distinta en la perpendicular.



Constelaciones del zodíaco

Los astrónomos antiguos percibieron que el Sol realiza un recorrido anual por la esfera celeste, parte de la cual se representa en la imagen con la banda azul. Los astrónomos asociaban las fechas con las constelaciones en este estrecho cinturón (conocido como zodíaco), y asignaban a cada una la fecha en la que el Sol pasaba por ellas. El astrónomo del siglo II Tolomeo dio nombre a los doce signos del zodíaco: Aries, Tauro, Géminis, Cáncer, Leo, Virgo, Libra, Escorpio, Sagitario, Capricornio, Acuario y Piscis. El Sol pasa por las constelaciones zodiacales en fechas diferentes a las marcadas tradicionalmente.

Ya desde muy antiguo se observaba todo esto y los astrónomos habían dividido la esfera celeste de las estrellas en doce gajos, señalados con los signos del Zodíaco. De aquí vino la división del año en doce meses, comenzando con el equinoccio de primavera (en el hemisferio norte), que corresponde al mes de marzo.

Aunque el mes se tomó originalmente de las fases de la luna, que con sus fases sirve de reloj mensual de manera tan clara para el hombre. El mes lunar medido por sus fases, de cuarto creciente a cuarto creciente, por ejemplo, es de 29,53 días, mientras que el mes solar, la doceava parte del año solar, es de 30,44 días. Las cuatro fases de la luna servían también para medir la semana que, después del día, es uno de los períodos de tiempo más antiguos del hombre, como aparece en el Génesis.

4º Otros movimientos que miden el tiempo

Como el tiempo es el número del movimiento, así como nos sirve el tiempo para medir los movimientos: «habló durante dos horas», «se movió a razón de 120 km por hora»; así también podemos usar movimientos muy conocidos por nosotros para dar idea del tiempo: «guardó silencio por espacio de un Pater», «duró un suspiro», «viene cada muerte de obispo».

Por esta vía se han buscado procesos de alta regularidad para que sirvan de patrones temporales muy precisos. Así se han construido relojes atómicos que no se refieren a movimientos inerciales sino electromagnéticos. Las observaciones físicas nos hacen pensar que los movimientos electromagnéticos no son primeros, por lo que no convienen para una definición esencial del tiempo, pero permiten medir intervalos temporales sumamente pequeños, por lo que dan medidas de tiempo de extraordinaria precisión. Uno de estos sistemas utiliza la luz de una de las líneas espectrales del átomo de cesio 133, y en 1967 se definió oficialmente el segundo como 9.192.631.770 períodos de esta luz de cesio. Con este método se pueden medir duraciones con una precisión de una parte en diez mil millones.

III. El tiempo y el «*quando*»

Así como distinguimos el espacio, el lugar y el estar de las cosas en el lugar o «*ubi*», conviene distinguir también el tiempo como duración, el instante o lugar temporal, y la temporalidad misma de las cosas o «*quando*». El lugar y el «*ubi*» se entienden en referencia a la magnitud o extensión de las cosas, y sólo tiene sentido distinguirlos en razón del cambio local. El tiempo y el «*quando*» se entienden en referencia al movimiento local y, por medio del movimiento, a la magnitud o cantidad continua. El tiempo y el espacio, entonces, tienen una estrecha relación, y la noción que los vincula es la del movimiento local. Espacio – movimiento – tiempo: éste es el orden natural que tienen y el orden en que conviene entenderlos, para ir de lo más claro a lo menos. De la evidente continuidad del espacio, por ejemplo, entendemos la continuidad del movimiento local, y de ésta la continuidad del tiempo. Estas dos últimas continuidades no dejan de ser evidentes, pero no lo son tan claramente como la primera. Principalmente porque las partes de la cantidad espacial existen todas a la vez, mientras que las partes del movimiento y del tiempo no existen como tales, sino que sólo existe el momento del movimiento y el instante del tiempo. ¿Vieron que no es tan claro?

Por eso se confunden los físicos modernos cuando parten del espacio y del tiempo como nociones primeras, y a partir de ellas pretenden *definir* (sólo logran *describir*) el movimiento: definen el movimiento a partir del tiempo, cuando tendrían que hacer al revés, definir el tiempo a partir del movimiento.

1º El tiempo como duración

Así como el espacio puede entenderse como el conjunto universal de los lugares, donde se abstrae de las cosas que los ocupan, así el tiempo, entendido como duración, es la sucesión numerada de todos los instantes del movimiento local primero.

El espacio, dijimos, no puede ser infinito, pues implicaría una indeterminación ontológica de las cosas naturales que lo constituyen. Pero el tiempo sí puede ser infinito, tanto por lo pasado como por lo futuro, porque como no existe todo a la vez, sino que sólo existe el instante presente de las cosas móviles, no hay contradicción en pensar que haya siempre un instante anterior a todo instante pasado, ni un instante posterior a todo instante futuro. La Fe cristiana nos revela que hubo un instante inicial del mundo, en el que comenzó el tiempo: "*En el principio* creó Dios el cielo y la tierra" (Gén 1, 1), y nos revela también que habrá un fin del tiempo, con la segunda venida de Nuestro Señor. Pero estas son verdades que no pueden ser alcanzadas por la observación científica.

Así como el tiempo no tiene máximo, tampoco tiene mínimo, porque si bien el número como tal (propio de la cantidad discreta o multitud) tiene como mínimo la unidad, el tiempo es número aplicado a una realidad continua, que es el movimiento local, referido a la cantidad continua.

El espacio se divide y distingue según los lugares, el tiempo, en cambio, se divide y distingue según sucesión, *secundum prius et posterius*. Como se define según el primer movimiento local que regula a todos los demás movimientos, no hay tiempos diversos para los diversos móviles, sino que todos los móviles que existen a la vez, están en el mismo y único tiempo, mientras que el año anterior y el año siguiente, aunque duren lo mismo, son tiempos diferentes. Así como no es lo mismo pasar del kilómetro 4 al 5, en un camino, que del 5 al 6, aunque en ambos se ha recorrido la misma distancia, porque no se está a la misma distancia del término, así también pasa con el tiempo.

El tiempo, como duración, puede ser mayor o menor, como los números, pero no puede ser más lento o más rápido, como sí ocurre con los movimientos. Porque justamente el tiempo es el número del movimiento, que lo mide en su lentitud o velocidad. Así como no puede decirse que el número de la multitud sea mayor o menor, pues el número es el que mide a la multitud y permite compararla, así también pasa con el tiempo. El número es comparación con cierta unidad homogénea, y en el caso del tiempo, la unidad homogénea le viene del primer movimiento, que por el hecho mismo de ser primero, es regular y constante.

En síntesis, el tiempo presenta **tres propiedades**:

- No tiene *máximo* ni *mínimo*.
- Es el *mismo* para movimientos coexistentes, y *distinto* para movimientos sucesivos.
- Es mayor o menor pero no *rápido* o *lento*.

2º El instante presente

El instante es al tiempo como el lugar al espacio. Así como el lugar determina el espacio ocupado por un cuerpo, pero no es parte y porción de espacio, sino término o límite del espacio, así también el instante no es parte o porción de tiempo, sino término o límite del tiempo. Así como el espacio de un cuerpo queda determinado por su superficie envolvente, que es el lugar, así el tiempo de una cosa o un proceso natural queda determinado por el instante inicial y el instante final. Pero lugar e instante tienen una profunda diferencia, porque el lugar es el término continente inmóvil del cuerpo natural, que es móvil, por lo que hay discontinuidad entre el lugar y la superficie envolvente del mismo cuerpo. En cambio el instante, como fin del tiempo pasado e inicio del tiempo futuro, es término continuo, que pertenece a ambas partes del tiempo. En caso contrario, no podría pensarse en el tiempo como algo continuo.

Podemos, entonces, señalar otras **tres propiedades** del instante:

- Del tiempo *sólo existe* el instante.
- El instante *no es parte* del tiempo (por lo que el tiempo tiene una existencia imperfecta).
- El instante *divide* las partes del tiempo, pero las *continúa*.

3º La temporalidad de las cosas

El «quando» es al instante como el «ubi» al lugar. Así como el «*ubi*» es la realidad accidental implicada en el cuerpo natural por el hecho de estar en tal lugar y no en tal otro, así el «*quando*» o situación temporal es la realidad accidental implicada en la cosa natural por el hecho de estar en un tiempo, esto es, de existir en tal instante y no en tal otro. Como lo que es afectado por el *quando* es aquello que *está en el tiempo*, debemos analizar qué significa estar en el tiempo, lo que nos lleva a distinguir tres tipos de cosas: las que están *por sí mismas* en el tiempo, las que *permanecen* en el tiempo y las que están *con* el tiempo pero no *en* él.

Como el tiempo es el número *del movimiento* según el antes y el después, lo que *está propiamente y por sí mismo en el tiempo* y es temporal, es lo que cambia y se mueve. Es temporal la magnitud de las cosas que disminuyen y crecen, son temporales las cualidades de las cosas que se alteran, es temporal el lugar que ocupan las cosas. Todas estas cosas están en cierta manera medidas por el tiempo, en cuanto dependen de algún modo del primer movimiento local, y de todas ellas, entonces, puede determinarse una cierta velocidad de cambio, como la velocidad de aumento, de enfriamiento, de traslación o rotación.

Las cosas naturales, en cuanto a su ser substancial, no están propiamente y por sí mismas en el tiempo, porque el ser substancial del perro no cambia mientras el perro es perro. Pero se puede decir que las substancias naturales están en el tiempo por dos vías:

- en cuanto son *sujeto* de movimientos, pues lo que crece, se altera o se mueve es el perro;
- en cuanto *permanecen* en el tiempo, siendo medidas por el tiempo, porque hubo un instante en que comenzaron a ser, y hay un instante en que dejan de ser.

Si hubiera cosas con un modo de ser substancial incorruptible, pero sujetas a cambio local, como pensaban los antiguos que ocurría con los cuerpos celestes, estarían en el tiempo en cuanto sujetos de movimiento, pero no en cuanto a la permanencia en el ser.

Las cosas que son incorruptibles e inmutables, como Dios y los ángeles, no están de ninguna manera en el tiempo. De los ángeles puede decirse que existen *con el tiempo*, porque son y existen mientras son y existen las cosas temporales, y pueden obrar sobre ellas in diversos instantes, pero a ellos no les *pasa el tiempo* porque no los afecta ningún tipo de cambio temporal. Sus actos tienen un antes y un después que no es medido por el tiempo sino – dicen enigmáticamente los teólogos – por el «evo» (especie de tiempo angélico no continuo). De Dios, en cambio, no puede decirse ni siquiera que es y existe *con el tiempo*, porque en su inmutabilidad absoluta está presente y obra en todo instante, sin que pueda darse en Él de ningún modo un antes y un después.

El tiempo es número del movimiento *según el antes y el después*, de allí que la temporalidad o «*quando*» de las cosas es aquello que las afecta por relación con lo que antecede y con lo que sigue. Así como el *ubi* de las cosas naturales tiene tanta importancia porque el lugar es la superficie de contacto por la que la cosa entra en

interacción con todo lo que la rodea, así el *quando* de las cosas naturales tiene también mucha importancia porque el instante que ocupa la cosa en la sucesión temporal da razón de su interacción con lo que la antecede y la sigue.

Así como vimos algunas propiedades del lugar, podrían señalarse propiedades análogas para la situación temporal. Podemos decir que el *tiempo contiene las cosas temporales*, porque siempre puede pensarse un tiempo anterior al instante de inicio de cada cosa, y un tiempo posterior al instante final. También que *cada cosa tiene su tiempo*, pues en su ser y su hacerse pueden ser medidas por el tiempo.

Pero sobre todo hay que decir que, así como cada cosa tiene su lugar propio o natural, donde está en equilibrio y armonía con las demás cosas que la rodean, así también *cada cosa tiene su tiempo propio* o natural. El niño nace a los nueve meses, porque una cosa no puede venir después de cualquier otra y toda generación tiene su proceso con sus tiempos. Y la madurez presupone la adolescencia, y la adolescencia la infancia: "Todo tiene su momento, y cada cosa su tiempo bajo el cielo: Su tiempo el nacer, y su tiempo el morir; su tiempo el plantar, y su tiempo el arrancar lo plantado. Su tiempo el matar, y su tiempo el sanar; su tiempo el destruir, y su tiempo el edificar. Su tiempo el llorar, y su tiempo el reír; su tiempo el lamentarse, y su tiempo el danzar. Su tiempo el lanzar piedras, y su tiempo el recogerlas; su tiempo el abrazarse, y su tiempo el separarse. Su tiempo el buscar, y su tiempo el perder; su tiempo el guardar, y su tiempo el tirar. Su tiempo el rasgar, y su tiempo el coser; su tiempo el callar, y su tiempo el hablar. Su tiempo el amar, y su tiempo el odiar; su tiempo la guerra, y su tiempo la paz. ¿Qué gana el que trabaja con fatiga? He considerado la tarea que Dios ha impuesto a los humanos para que en ella se ocupen. Él ha hecho todas las cosas apropiadas a su tiempo; y también ha puesto el conjunto del tiempo en sus corazones, pero el hombre no es capaz de descubrir la obra que Dios ha hecho de principio a fin" (Ecl 3, 1-11).

IV. EL ESPACIO Y EL TIEMPO EN LA *TEORÍA DE LA RELATIVIDAD*

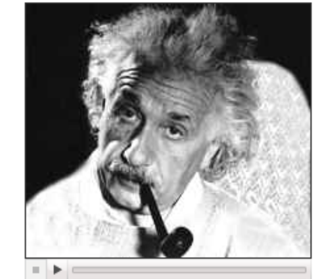
Parece que pecamos justamente contra el *tiempo propio* al referirnos ahora a la *teoría de la relatividad*, que supone la más alta madurez de la Física, cuando todavía estamos en los pañales de su infancia. Pero muchas veces se halla la verdad en la boca de los niños, que miran las cosas con ingenuidad y no se dejan afectar por adultos prejuicios. Haremos solamente una simple observación que tiene que ver con los fundamentos del método científico, de allí que la propongamos en este punto.

La teoría de la relatividad arranca de un doble principio, que – reconoce Einstein – no se demuestra sino que se induce de la experiencia: *Primero*, no existe ningún cuerpo inmóvil respecto del cual pueda definirse el movimiento de modo absoluto; *segundo*, las leyes físicas son las mismas para cualquier marco inercial de referencia. Einstein la llamó teoría de la *relatividad* justamente porque, al no haber marco absoluto de referencia, los movimientos no tienen una realidad absoluta, sino relativa a este o a aquél marco de referencia. Estando aquí sentado, ¿me muevo o no me muevo? Respecto de la tierra no, pero respecto del sol sí, y ninguna respuesta tiene preferencia, pues el movimiento sería realidad relativa: ¿Soy grande o pequeño? Respecto de la hormiga soy grande, respecto del elefante soy pequeño.

Este principio va contra lo que hemos dicho del *espacio inmóvil*, respecto del cual – hemos sostenido – puede definirse de modo absoluto cualquier movimiento. Y no vamos a protestar demasiado por este atropello, porque hay muchas observaciones físicas que son sugeridas por ciertas apariencias, y una investigación mejor puede mostrar que no son lo que parecían. Así los antiguos creyeron que los astros eran incorruptibles, y no por eso pecaron contra la ciencia. Que el espacio sea inmóvil es sugerido por las leyes de la física, pero no sólo ni principalmente por las leyes de la mecánica newtoniana, ni por las del electromagnetismo maxwelliano, sino por las leyes de causalidad mejor entendidas, como luego veremos. Por eso no renunciaremos tan fácilmente a nuestro principio. Pero no es un principio de evidencia primera, por lo que por ahora no lo defenderemos.

Albert Einstein

Albert Einstein es considerado uno de los mayores científicos de todos los tiempos. Tres artículos suyos publicados en 1905 fueron trascendentales para el desarrollo de la física e influyeron en el pensamiento occidental en general. Los artículos trataban de la naturaleza de la luz, describían el movimiento molecular e introducían la teoría de la relatividad restringida. Einstein es famoso por replantearse continuamente suposiciones científicas tradicionales y sacar conclusiones sencillas a las que nadie había llegado antes. No se conoce tanto su compromiso social, aunque era un ardiente pacifista y sionista. En



Pero sí defendemos que el espacio vacío es algo, pues la extensión que ocupa no puede darse sin un sujeto substancial. Estas sí son evidencias fundamentales, no de orden físico sino metafísico. Y no saber nada del espacio es pecado de Einstein confesado (aunque no perdonado, pues no manifiesta arrepentimiento): "Si yo – dice –, sin madura reflexión y más profundas explicaciones, formulo el problema de la Mecánica diciendo: «La Mecánica tiene por objeto estudiar las variaciones de lugar que, con el tiempo, sufren los cuerpos en el espacio», cargo sobre

mi conciencia algunos pecados mortales contra el santo espíritu de la claridad, y para tranquilizarla los confesaré antes de seguir adelante. No está claro lo que deba entenderse por *lugar* y *espacio*. Supongamos que desde la ventanilla de un vagón del ferrocarril, en movimiento uniforme, dejo caer a la vía una piedra sin darle impulso ninguno, yo la veo caer según una línea recta (prescindiendo de la resistencia del aire); pero un individuo que presencie los hechos desde el terraplén la ve caer según un arco de parábola. Entonces ocurre preguntar: ¿los «lugares» que la piedra recorre están «realmente» sobre una recta o sobre una parábola? ¿qué significa además la locución *movimiento en el espacio*? La contestación es inmediata después de lo dicho en el § 2. En primer lugar, demos de lado a la palabra *espacio*, tan obscura que honradamente no podemos razonar sobre ella, y sustituyamos esa locución por la siguiente: «movimiento con relación a un cuerpo de referencia prácticamente rígido», más conveniente porque las posiciones respecto a los cuerpos de referencia (vagón o vía), han sido definidas con suficiente claridad en el párrafo anterior"[1]. No es tan honrado no razonar sobre el espacio, sobre todo para un físico, y al no querer hablar de *movimiento en el espacio* no es de extrañar que aparezcan problemas.

En la misma obrita de divulgación citada, Einstein reconoce que "apenas si en toda la Física puede encontrarse ley más sencilla que la de propagación de la luz en el vacío; cualquier niño de escuela sabe (o cree saber) que esta propagación se efectúa en línea recta, con una velocidad constante c = 300.000 Km/seg" (p. 15). Pero aunque nuestro físico acepta que la constancia de la velocidad de la luz es un principio físico fundamental, se niega a medirla respecto del vacío: "Naturalmente, el proceso de propagación de la luz, como cualquier otro, debemos referirlo a un cuerpo sólido, como sistema de coordenadas" (p. 16). Aquí, entonces, aparece lo raro, pues un mismo fotón de luz se acercaría a dos cuerpos a la misma velocidad c, por más que estos cuerpos estén en movimiento relativo entre ellos. Si el fotón partió cuando ambos cuerpos estaban a la misma distancia, tendría que alcanzarlos a ambos al mismo tiempo; pero como los alcanza después de un rato, en ese rato ambos cuerpos se separaron, ¿por lo que el mismo fotón los tocaría al mismo tiempo en dos lugares diferentes? ¿Cómo hace un mismo fotón para estar más atrás y más adelante en un mismo instante?

Einstein se las arregla diciendo que, como la velocidad se define en razón del espacio y el tiempo, la velocidad de la luz puede ser la misma para los dos cuerpos en movimiento relativo, siempre y cuando no sean lo mismo ni los metros ni los segundos en que se miden el espacio y el tiempo respecto de cada cuerpo. Curioso. Para el que se acerca a la luz, los metros son más cortos y los segundos más lentos.

No vemos objeción de principio en pensar que los cuerpos puestos a gran velocidad muestren una contracción en sus dimensiones, un aumento de su masa y retardo en sus movimientos inerciales: "En un experimento, realizado en 1971, se transportaron relojes atómicos en dos aviones que viajaban a gran velocidad. Uno de ellos volaba hacia el Este, es decir, en el sentido de rotación de la Tierra, y el otro hacia el Oeste. Después del vuelo, los relojes transportados estaban atrasados o adelantados en relación con un reloj atómico que permaneció en tierra según se hubieran desplazado en uno u otro sentido, con lo que se confirmó una de las predicciones de la relatividad"[2]. Lo que no se puede aceptar, y es inmediata consecuencia de los principios de la teoría de la relatividad, es que dos acontecimientos sean *simultáneos* para un observador y no lo sean para otro con igual legitimidad física: "Fenómenos simultáneos respecto a la vía, no lo son respecto al tren (*Relatividad de la simultaneidad*)" (p. 23). Simultaneidad significa coexistencia. Dos acontecimientos simultáneos son dos cosas que existen en el mismo instante, mientras que de las que no son simultáneas, una existe antes y la otra después. Decir que lo que es simultáneo para uno no lo es para otro, y que ambos están en la verdad, es decir que una cosa puede ser y no ser a la vez y en el mismo sentido, lo que es metafísicamente contradictorio.

Es verdad que Einstein no hace un análisis ontológico del tiempo ni de la simultaneidad, pretendiendo definirla por el método de medirla experimentalmente: "El concepto [de simultaneidad] existe para el físico desde el momento en que hay posibilidad de comprobarlo en casos concretos, y, por consiguiente, hace falta una definición de simultaneidad que por su propia naturaleza dé el método para decidir en casos concretos y por medio de experimentación si los dos rayos han caído o no simultáneamente. Mientras esta condición no sea satisfecha, como físico (y también como no físico) me engaño a mí mismo si creo poder atribuir un sentido a la afirmación de *simultaneidad*" (p. 19). La limitación que pone nuestro físico en la noción de simultaneidad es ilegítima y anticientífica.

Esta consecuencia contradictoria nos hace ver que hay un defecto en los principios propuestos. Como no puede haber *relatividad de la simultaneidad,* tampoco puede haber *relatividad de marcos referenciales*. Si dos acontecimientos coexisten, está en la verdad el que los mide simultáneos, y están errados los que miden otra cosa. Esta pobre gente tendría que darse cuenta que su situación de movimiento los lleva a medir mal. En el peor de los casos, dándole a

---

[1] Albert Einstein, *La Teoría de la Relatividad al alcance de todos*, 3ª ed. española, Biblioteca Scientia, Toledo 1925, p. 8-9.

[2] Enciclopedia *Encarta*, art. Tiempo.

Einstein el mayor crédito posible, la situación de los físicos sería tal que no estarían en posibilidad de saber la verdad sobre las cosas naturales, lamentable condición del hombre. Nos parece más saludable pensar que el físico puede determinar un marco de referencia absoluto, como lo sugiere la mirada ingenua del niño sobre las leyes físicas. ¿Qué implica aceptar este principio? ¿Cuántas cosas habría que corregir en su aplicación a los fenómenos físicos? Somos niños y no nos toca contestar. Sólo queríamos señalar que el rey de los físicos está desnudo.

G. El movimiento y la causalidad

Debemos ir terminando el recuento de nuestro capital para comenzar de una vez por todas con la empresa de la investigación científica de la naturaleza. Hagamos un breve repaso de lo que venimos anotando. Comenzamos, como conviene, planteando el problema físico más general de lo permanente y lo cambiante, distinguiendo cosas y procesos naturales. Y dimos la respuesta más general: lo permanente que explica lo cambiante es la *naturaleza*, que es el *principio o causa intrínseco* del cambio. La naturaleza es un principio *intrínseco*, y por lo tanto no inmediatamente evidente para cualquiera, *quoad omnes*: el físico debe agudizar su espíritu científico para descubrirlo. Pero como lo oscuro se ilumina con lo claro, empezamos analizando aquello en lo que todos pueden estar de acuerdo.

Comenzamos distinguiendo substancia y accidentes, y entre los accidentes estudiamos los dos más evidentes: cantidad y cualidad. Entre las cuatro especie de cualidades consideramos especialmente dos: las potencias activas y pasivas, y las cualidades pasibles. Luego pasamos a analizar el movimiento, porque el problema físico se nos presenta con el cambio. Distinguimos entre cambios (instantáneos) y movimientos (continuos), lo que nos llevó a considerar otros dos accidentes: la acción y la pasión. Dividimos, entonces, tres especies de movimientos: en la cantidad, en la cualidad y en la ubicación. Como se ve que el movimiento en la ubicación, al que llamamos *movimiento local*, es a la vez el más simple y primero de todos, humildemente nos propusimos restringir nuestra investigación a sólo el movimiento local: éste será el arroyo que nos lleve al mar. El movimiento local nos pidió estudiar dos accidentes más: el *ubi* y el *quando*, con las dos nociones que se les asocian: el espacio y el tiempo.

Hasta aquí habíamos llegado. Ahora nos queda referirnos a un último aspecto evidentísimo implicado en el movimiento, que es la *causalidad*. El principio y ley de la causalidad es el que nos ofrece el camino para descubrir la *naturaleza*, que es – dijimos – la *causa intrínseca* del movimiento.

I. El principio de causalidad

1º Evidencia y formulación del principio de causalidad

La primera evidencia intelectual es que las cosas son o existen y que tienen un modo propio de ser. No nos hace falta sumar demasiada experiencia para darnos cuenta que esta piedra y aquel árbol, este perro y aquel gato existen y tienen diversos modos de ser. Esta evidencia primerísima, considerada en toda su generalidad, se expresa en el principio de no contradicción: «Algo no puede ser y no ser a la vez y bajo el mismo aspecto». Algo no puede ser perro y a la vez ser gato, porque ser gato implica no ser perro, y sostener a rajatablas que algo es perro y no es perro a la vez y bajo el mismo aspecto no dice bien de la salud mental del que lo sostiene. Hemos agregado, como letra chica, *a la vez*, porque algo puede ser perro y dejar de serlo después que lo atropelló el auto. Y también agregamos *bajo el mismo aspecto*, porque algo puede ser perro por naturaleza y gato de nombre, pues hay gente original a la hora de bautizar las cosas.

La segunda evidencia intelectual es que las cosas no comienzan o dejan de ser y no pasan a ser de otro modo sin una causa. Como se puede ver, esta segunda evidencia nos habla de la consistencia de la primera. Ser algo y de un modo no es poca cosa, y la *novedad en el ser* no puede darse por nada, sin una causa. Esta evidencia es también proclamada por la experiencia más cotidiana. ¿Dónde está el jarrón de la abuela? pregunta la mamá enojada, y el niño le contesta: No sé, dejó de ser por nada. Las cosas no se generan ni se corrompen sin causa, no engordan ni adelgazan sin causa, no se calientan ni enfrían sin causa, no se mueven ni se detienen sin causa.

Como el buen método nos pide considerar las cosas en toda su generalidad, si tenemos en cuenta lo que dijimos del cambio en general, podemos expresar el principio de causalidad así: «*Todo lo que cambia tiene causa*».

No han faltado, ni faltan, ni faltarán los que nieguen el principio de causalidad, como tampoco faltan los que niegan el principio de no contradicción. Pero lo niegan de palabra y no por convicción, porque son evidencias tan primeras que no se puede observar un cambio sin dar por supuesto inmediatamente que fue por algo, por alguna causa. Pero como hay muchos científicos y filósofos que han roto el jarrón, se empeñan en decir que algo puede

ser o dejar de ser por nada. Con estos hermanos nuestros no discutimos, a ellos los arregla mamá Sofía (la Metafísica) y por un rato no se pueden sentar.

2º La noción de causa

La noción de causa es tan primera que la misma palabra latina que la significa, *causa*, no tiene etimología conocida. Algunos creen que viene de *casus*, participio del verbo *cado*, que significa caer. De este verbo viene *casualidad*, pero no es seguro que venga también causa y causalidad, que significa más bien lo contrario.

Como ocurre con todas las nociones primeras y generales, no cabe dar propiamente una definición por alguna noción más general, pero sí podemos dar una manera de explicación. Así como al explicar qué es ente decimos: «aquello que es», *id quod est*, así también para explicar qué es causa Santo Tomás dice: «aquello de lo que algo depende según el ser o el hacerse», *ex quo aliquid dependet secundum suum esse vel fieri*.

Así como en el ente podemos distinguir dos aspectos, el hecho de ser o existir (expresado por el verbo *est*) y el modo de ser (implicado en *id quod*), pues cada cosa tiene un modo propio de ser o existir, así también hay que distinguir dos aspectos correlativos en la noción de causa, la *preexistencia* y la *proporcionalidad*:

- *Preexistencia*. Como se entiende por causa aquello de lo que algo *depende* según el ser o el hacerse, la causa debe *preexistir*, ser o existir con anterioridad al efecto, pues su existencia es lo que explica la posterior existencia del efecto. Quizás esta preexistencia no sea necesariamente de orden temporal, de manera que la causa tenga que existir un minuto o un segundo antes del efecto (vemos que muchas veces es así, pero hay casos de efectos inmediatos), pero al menos tiene que haber una preexistencia de naturaleza. No podemos llamar causa a lo que es posterior al efecto.
- *Proporcionalidad*. Como la causa debe explicar no solamente la existencia del efecto, sino también su modo de ser, la causa no sólo debe preexistir, sino que también debe ser *proporcional* al efecto. Una hormiga no puede engendrar un elefante, ni se engordan diez kilos por comer una uva (como a veces quiere hacer creer el gordo), ni el calor de una vela seca las nubes, ni una gallina detiene un tren.

Apoyándonos en estas dos propiedades de toda causa, algo podremos decir de la naturaleza de las cosas.

II. LAS CUATRO CAUSAS

La noción de «causa», a semejanza de la noción de «ente», es una noción en sí misma muy amplia e indeterminada, de aquellas que llamamos *analógicas*, que se puede dividir primeramente en *cuatro* grandes géneros: *causa material*, *formal*, *eficiente* y *final*. Cuando investiguemos lo que cada una de ellas supone en la realidad de las cosas, nos hallaremos con profundos misterios, pero en su división y clasificación sólo tomamos en consideración ciertos aspectos generales y evidentes, en los que nadie que piense rectamente puede poner objeción:

1º Causa formal

La *causa* o *porqué* primero que dan los sabios al explicar las propiedades de las cosas es la esencia, conocida por medio de la definición. ¿Por qué la oveja tiene cuatro estómagos? Porque es un mamífero rumiante. ¿Por qué el hombre es el único animal que nace sin instintos y necesita educación? Porque es racional. La diferencia específica es causa de muchas propiedades específicas de las cosas, y los diferentes géneros a los que pertenece algo son causas de propiedades genéricas (rumiante es un género). Ahora bien, la esencia es como la forma común que tiene la multitud de individuos que pertenecen a un mismo género o especie. De allí que se denomine *formal* a este modo de causas.

Estómago de cuatro cavidades
Los verdaderos rumiantes tienen un estómago con cuatro cavidades. Pertenecen a este grupo las ovejas, el ganado vacuno, las cabras, los antílopes, los ciervos y las jirafas.

2º Causa material

No sólo la forma o esencia es causa de las propiedades de las cosas, sino también la materia de la que están hechas. Un triángulo tiene muchas propiedades que se explican por su esencia, como – por ejemplo – que sus ángulos interiores sumen dos rectos; pero un triángulo de madera tiene, además, la propiedad de ser combustible, y uno de metal la de conducir la electricidad. Estas propiedades se explican en razón de la *materia*, que es un segundo modo de causa.

3º Causa eficiente

A la madera no le es natural tener forma de triángulo, de manera que si nos encontramos con un triángulo de madera, se hace evidente que algún carpintero lo hizo. Este tipo de causas, que explican que ciertos materiales tengan modos de ser que no les pertenecen por esencia, se denominan *causas eficientes* o *agentes*.

4º Causa final

El carpintero podía haberle dados muchas formas distintas a la tabla de madera que tenía entre manos, pero como le pidieron una escuadra para las clases de Matemáticas y Física, la cortó en triángulo. Este pedido y necesidad es una verdadera causa, pues explica por qué hizo lo que hizo, pudiendo hacer otra cosa. A este tipo de causas se lo denomina *causa final,* porque al motivo que mueve un obrero a obrar se lo llama fin.

III. LAS CAUSAS NATURALES DEL MOVIMIENTO LOCAL

Como puede suponerse, estos géneros de causas se dan en todo orden de cosas, ya sean naturales o artificiales, ya en la consideración metafísica, lógica o moral de las cosas. Pero a nosotros nos interesa descubrir las causas en el orden de las cosas físicas o naturales, y en particular – en este primer curso – queremos determinar las causas del movimiento local.

1º Qué causas consideramos en nuestro Curso de Física

La naturaleza es, justamente, la causa intrínseca propia y *per se* de la que depende lo que las cosas naturales permanecen siendo (*esse*), o el modo en que cambian y se mueven (*fieri*). El objetivo de las Ciencias naturales es precisamente determinar en particular la naturaleza, para así responder a la última de las preguntas científicas: *Propter quid, ¿Por qué* tal cosa es así y obra de tal manera? Hay que preguntarse, entonces, qué especie de causa será la naturaleza, ¿formal o material, eficiente o final? No hace falta pensar mucho para darse cuenta que en lo que llamamos naturaleza se dan las cuatro especies de causas:

- Cada cosa tiene su esencia o forma de ser, que causa y explica sus propiedades y modos de obrar.
- Muchos aspectos de los procesos naturales se explican por los materiales que constituyen las cosas.
- También se atribuyen a la naturaleza los principios activos o agentes de los procesos que sufren las cosas, como la generación del osito se atribuye a la potencia generativa del oso.
- Y muchas veces se observa que los procesos naturales persiguen algunos fines bien determinados de antemano.

Pero respondiendo al buen método, nosotros nos hemos reducido a investigar el problema natural más simple, aunque primero, que es el del movimiento local. Por lo que no nos van a importar las cuatro especies de causas de la misma manera: no consideraremos las causas finales y formales, sino sólo las eficientes y materiales.

Porque los movimientos locales, que nosotros consideraremos *aisladamente*, son los movimientos iniciales y elementales de los procesos naturales. Ahora bien, el que sólo estudia los procesos iniciales en el arte, por ejemplo, de la arquitectura, considera las herramientas que se utilizan y los materiales, pero no toma en cuenta todavía los fines de los edificios y las formas que se les adaptan, pues aquellos elementos primeros se tienen *indeterminadamente* a todo finalidad y forma arquitectónicas. Por lo tanto, en el orden natural, que es como el arte arquitectónico del Creador, nosotros ahora estudiaremos sólo los principios activos y pasivos (causas eficientes) y las disposiciones materiales de las cosas, sin considerar todavía los fines y formas naturales, para los que estos elementos se tienen *de modo indeterminado*. Los fines y formas se empiezan a tener en cuenta al estudiar las substancias químicas, y se consideran sobre todo en la ciencia de las cosas vivas.

2º Cómo se determinan las causas del movimiento local

Todo cambio o movimiento debe tener una causa *preexistente* y *proporcionada*. Este principio es tan evidente, que aunque lo que percibimos por los sentidos son sólo los cambios y movimientos, entendemos (por la inteligencia) la presencia de la causa con tanta evidencia como si la viéramos y tocáramos. Cuando *vemos* que una bola de billar en movimiento toca otra quieta y *oímos* el ruido característico, *entendemos* que el impacto elástico es causa del movimiento de la segunda y de la detención de la primera. No faltan insanos mentales, como David Hume, que ven que este movimiento de la segunda bola se da después del movimiento de la primera (*hoc post hoc*), y *dicen* no entender que el segundo sea causado por el primero (*hoc propter hoc*). Si algún alumno está en esta situación, le aconsejamos dejar el aula e ir a psiquiatría del hospital de Moreno.

Los físicos, entonces, observan los movimientos locales naturales de los cuerpos y deducen la *preexistencia* de causas *proporcionadas*: A iguales movimientos iguales causas, a distintos movimiento distintas causas. Hagamos un recuento de estos descubrimientos:

- La resistencia de los cuerpos a moverse o a detenerse exige la existencia de la *inercia*.
- La caída de los cuerpos a tierra y la dependencia mutua de los cuerpos celestes denuncia lo que se llamó fuerza de *gravedad*.
- Multitud de procesos muy diversos (eléctricos, magnéticos, lumínicos), que poco a poco se descubrieron relacionados, pide que se señale un par de principios contrarios que se han llamado *electricidad positiva y negativa*.
- Fenómenos más complejos, que han permitido desatar las explosiones nucleares, obligan a reconocer la existencia de la denominada *fuerza nuclear*.

Se observan y miden los movimientos y procesos de cambios, y se entienden las causas gracias al principio de causalidad. Al determinar las causas, hay que prestar atención para distinguir las que son propiamente potencias activas de las que son solamente potencias pasivas. Y distinguir las potencias de las cualidades pasibles. Por supuesto que todas estas realidades accidentales dependen del ser substancial de cada cosa, pero como nosotros nos entretendremos solamente con los movimientos locales, no llevaremos nuestro análisis a esa profundidad.

Como para determinar las causas primero hay que observar los movimientos, dedicaremos el tercer capítulo de nuestro *Curso de Física* a la descripción y medición de los movimientos locales, lo que los manuales modernos suelen llamar Cinemática, palabra que viene del griego κίνημα -ατος: movimiento (cinematografía significa imágenes gráficas con movimiento). En los capítulos posteriores investigaremos sus causas.

Capítulo Tercero
Cinemática o descripción de los movimientos locales

En este capítulo vamos a considerar el movimiento local en relación al espacio y al tiempo, sin tener en cuenta la naturaleza de las cosas que se mueven, por lo que el movimiento pierde así su razón de perfección o imperfección[1]. De las cosas que se mueven, entonces, sólo tendremos en cuenta su extensión corporal.

Podemos considerar el movimiento de un cuerpo en el espacio vacío – que mientras no se vea lo contrario consideramos inmóvil –, o los movimientos relativos de múltiples cuerpos. Cada cuerpo puede ser *rígido*, de modo que ninguna parte puede moverse localmente respecto de ninguna otra parte; puede ser *articulado*, de modo que tenga partes rígidas con movimientos relativos entre sí; o puede ser *fluido*, de modo que no tenga partes rígidas, sino que todas sus partes pueden tener movimiento relativo de unas con otras. Como los cuerpos articulados y fluidos pueden considerarse como múltiples cuerpos rígidos, comenzaremos considerando especialmente el movimiento de los cuerpos rígidos, pues el buen método pide comenzar por lo más simple.

En los cuerpos rígidos podemos distinguir dos especies de movimientos: el de *traslación*, que afecta a las partes en razón del todo, porque cada parte se mueve de la misma manera que todo el cuerpo; y el de *rotación*, que afecta al todo en razón de las partes, porque el movimiento total es el resultante del movimiento diverso de cada parte. Estos movimientos, por supuesto, pueden combinarse en un mismo cuerpo de diversas maneras.

Comenzaremos estudiando el movimiento de traslación, que es más simple, luego el de rotación, y finalmente consideraremos algunos movimientos combinados de mayor interés.

A. Movimientos de traslación de cuerpos rígidos

Para ir de lo más simple a lo más complejo, consideraremos primero el movimiento de traslación en una línea recta, luego en una superficie plana y finalmente en el espacio. Así podremos generalizar de a poco conceptos y métodos.

[1] Cf. «El movimiento en la ubicación: su debilidad y su importancia», p. 33.

I. MOVIMIENTOS RECTILÍNEOS DE TRASLACIÓN

1º Movimiento absoluto y relativo. Marcos de referencia

El movimiento local se da cuando un cuerpo cambia de lugar. El lugar – dijimos – es el *término inmóvil continente primero*, de manera que el movimiento absoluto de un cuerpo es el que se considera respecto de lo inmóvil, que es – al parecer – el espacio vacío. Cuando nosotros nos trasladamos en la superficie de la tierra, podemos medir la distancia recorrida al cabo de una hora, y la velocidad respecto del suelo firme, pero estos no son nuestros movimientos absolutos, sino relativos a la tierra, que se está moviendo a su vez en el espacio vacío.

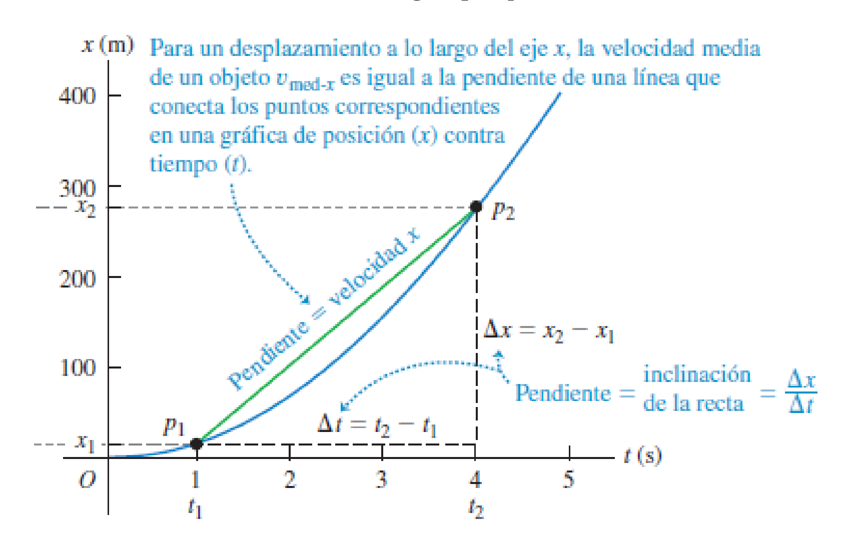
Volvamos a aclarar desde el comienzo que lo que más interesa al físico no son los lugares y movimientos *absolutos* de un cuerpo, sino los lugares y movimientos *naturales*. Es decir, lo que más interesa es cómo afectan los lugares y movimientos al cuerpo según su naturaleza, en relación a la naturaleza de los cuerpos que lo rodean. En el movimiento de una piedra, lo que más interesa es si se aleja o acerca a la tierra, pues por naturaleza tiende a acercarse lo más posible a ella. Pero advertimos que en este capítulo no tendremos todavía en cuenta la naturaleza de los cuerpos, sino sólo los lugares sucesivos que ocupan.

Dejar de lado la naturaleza de las cosas implica correr el riesgo de sacar consecuencias que no se ajusten a la realidad. Si en una nave espacial que viaja de 50.000 km/h, un astronauta se impulsa de popa a proa (de atrás adelante) a 10 km/h en relación a la nave, se supone que alcanza una velocidad absoluta de 50.010 km/h. Pero habría que ver cómo es en la realidad, porque parece que por la naturaleza del espacio vacío, no se puede ir más rápido que cierta velocidad máxima (la de la luz), de manera que la suma de velocidades que se puede hacer a velocidades bajas, quizás no se pueda hacer a velocidades altas. Y quizás lo que puede pasar con la suma de velocidades, podría pasar también con la suma de distancia. Porque si el que recorrió 1.000 km en una dirección, vuelve a recorrer otros mil en la misma dirección, decimos que está a 2.000 km de distancia del punto de partida. Pero quizás no es así para muy grandes distancias, porque ya pudimos sospechar que el universo no es un cubo infinito, y no sabemos a dónde vamos a parar si nos alejamos mucho en línea recta de nuestro lugar. ¿Puede que volvamos al mismo punto, como le pasaría a un viajero por la superficie de la tierra? Aunque se puede comprobar experimentalmente que para movimientos normales al hombre, las distancias y velocidades relativas se suman y restan en perfecto acuerdo con la realidad.



FIGURA 3.1
Cuando estás sentado en una silla, tu rapidez es cero con respecto a la Tierra; pero 30 km/s respecto al Sol.

Para medir distancias y velocidades, entonces, podemos tomar diferentes *marcos de referencia*. Un marco de referencia *absoluto* es el que está inmóvil, es decir, asociado al espacio vacío. Un marco de referencia *relativo*, es el que está asociado a un cuerpo en movimiento. En estos marcos de referencia hay que determinar un origen espacial y temporal, a partir del cual se puedan medir las distancias y los tiempos. Para los alumnos de la Escuelita del Niño Jesús, podemos tomar como *marco de referencia absoluto* el lugar que ocupaba nuestra aula el 1º de marzo de 2015: esta sería el lugar y tiempo de origen para medir distancias, tiempos y movimientos. A ese lugar lo hemos dejado lejos, porque rotamos a unos 30.000 km/h y nos desplazamos en el espacio a unos 100.000 km/h. Y no parece que volvamos nunca más al mismo lugar, porque el sol se mueve en torno al centro de nuestra galaxia, la Vía Láctea, y la galaxia tiene un cierto movimiento en el espacio. Espero que no les dé vértigo. Tomemos, mejor, como *marco de referencia relativo*, el centro de nuestra aula, y como inicio temporal la campana. En cada clase empezamos de nuevo.



Si sólo tomamos en cuenta por ahora movimientos rectilíneos, podemos describir los movimientos en un gráfico de coordenadas cartesianas, en uno de cuyos ejes señalamos el tiempo t, y en el otro la distancia x. En el eje horizontal del tiempo podemos medir los intervalos de tiempo: $\Delta t = t_2 - t_1$; y en el eje vertical los desplazamientos correspondientes: $\Delta x = x_2 - x_1$.

2º Rapidez y velocidad. Velocidad instantánea y media

El tiempo, dijimos, es el número del primer movimiento. Cuando decimos «tres horas, cinco días o tres años» mensuramos el movimiento de la tierra en el espacio. La manera de mensurar los demás movimientos es por comparación a este primer movimiento. Así podemos decir que un automóvil se movió 270 km en tres horas, o que un peregrino caminó 180 km en cinco días, o que un asteroide viajó 5.000 millones de km en tres años.

Al comparar estos tres movimientos: el del automóvil, el del peregrino y el del asteroide, al movimiento de la tierra, gracias al tiempo, surge la posibilidad de comparar estos movimientos entre sí, y decidir cuál es más lento o más rápido. ¿Cómo hacemos? Supongamos que estos tres móviles se han trasladado durante todo el intervalo de tiempo de cada uno con la misma rapidez (o lentitud). Aclaremos que el tranquilo peregrino sólo caminaba seis horas por día. Siendo así, podríamos calcular cuánto se movió cada uno en una hora de tiempo y comparar las distancias: el que se movió más, va más rápido, el que se movió menos, más lento.

Automóvil	270 km en tres horas	270 km en 3 h	90 km en 1 h	25 m/sg
Peregrino	180 km en cinco días	180 km en 30 h	6 km en 1h	1.7 m/sg
Asteroide	5 10^9 km en tres años	5 10^9 km en 26.280 h	190.000 km en 1h	53.000 m/sg

Los números hallados miden la rapidez de los movimientos. El modo de calcularlos es dividiendo la distancia recorrida por el intervalo de tiempo tardado: $Rapidez = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ Como hemos medido la distancia en kilómetros y el tiempo en horas, la unidad que le corresponde a la rapidez es km/h, que significa: km recorridos por cada hora, y que se suele leer resumidamente: km por hora. Por supuesto, pueden utilizarse otras unidades, como metros recorridos por cada segundo: m/sg que, como un km tiene 1000 m y una hora 3.600 sg, arroja números menores para la rapidez (3.6 veces menores). El peregrino va a 1.7 m/sg, lo que equivale a dos pasos por segundo, que es como ir al ritmo del corazón: un paso sístole, un paso diástole. Para móviles muy rápidos puede convenir usar unidades de distancia mayores con unidades de tiempo menores. Así decimos que la luz se mueve a 300.000 km/sg. Nuestro asteroide se mueve a 53 km/sg. En el espacio vacío las cosas suelen viajar muy rápido.

Estamos usando el término *rapidez*, y se suele hablar de *velocidad*. ¿Es lo mismo? Podrían usarse como sinónimos, pero nosotros vamos a distinguir estos dos términos con precisión: la *rapidez* es el valor absoluto de la distancia recorrida por unidad de tiempo, mientras que la *velocidad* es ese mismo valor pero incluyendo la idea de *dirección*. Porque dos automóviles pueden ir con la misma rapidez, pero uno en una dirección y el otro en dirección contraria: la rapidez es la misma, pero las velocidades son contrarias. Ahora que sólo tenemos en cuenta movimientos rectilíneos, la velocidad sólo puede tener dos direcciones: *positiva* (si se va en la dirección de x creciente), o *negativa* (si se va en la dirección de x decreciente). Por no complicarnos, hablaremos más frecuentemente de velocidad, como noción más completa, pero si sólo tenemos en cuenta su magnitud y no su dirección, entonces equivale a rapidez. Como notación simplificada, pondremos v para la rapidez, y $\vec{v}$ para velocidad (con la flecha que indica dirección).

Sólo el primer movimiento marcha a ritmo constante, porque no tiene influencia externa y cada nuevo metro es recorrido con el mismo impulso del metro anterior (ya volveremos sobre esto al considerar las causas del movimiento). Los demás movimientos suelen variar en su rapidez, yendo más lento o más rápido en diversos tiempos. El automóvil acelera y frena, y vuelve a acelerar, no recorre cada uno de los 270 km con la misma velocidad. El peregrino empieza con buen paso, y luego de cuatro horas sigue con paso más cansado. Por efecto de la gravedad, el asteroide se acelera al acercarse al sol, y desacelera al alejarse. La rapidez que calculamos corresponde a la de un móvil ideal que hubiera recorrido toda esa distancia con velocidad constante. Es lo que podemos llamar la rapidez promedio o también *velocidad media*.

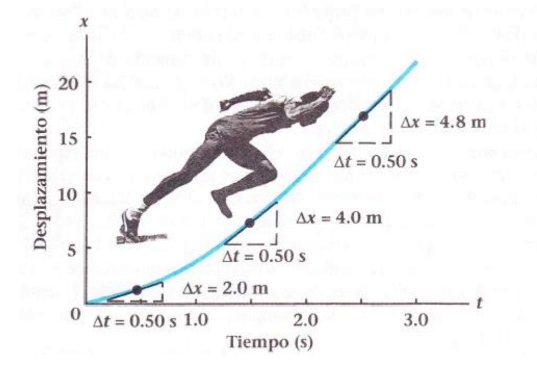
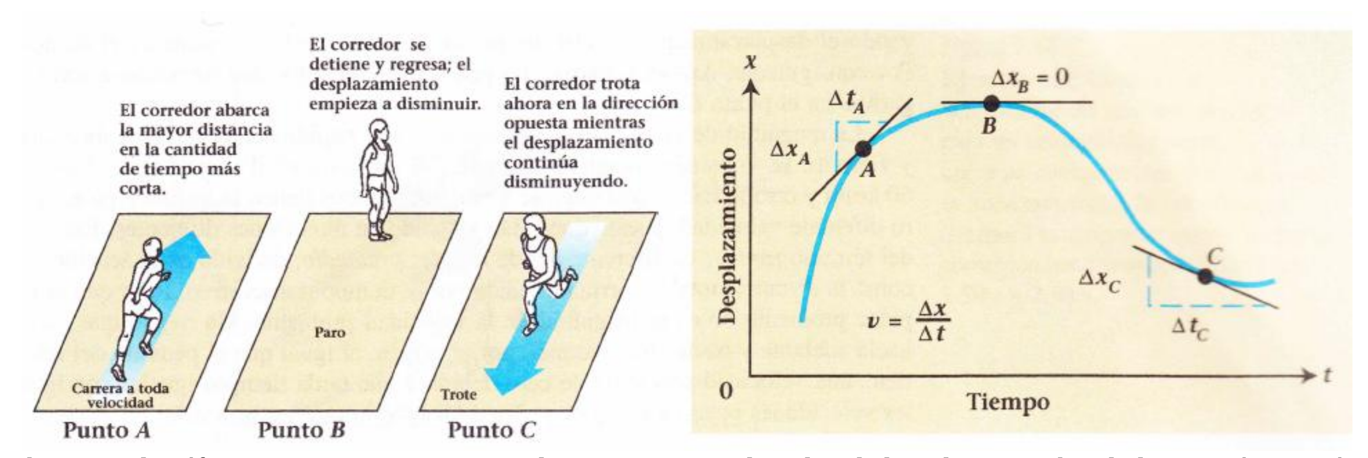


Figura 2.18
Ejemplo 2.9: Gráfica del desplazamiento respecto al tiempo para un velocista. La pendiente de la curva en cualquier tiempo se mide de la línea tangente a la curva en ese tiempo. Las tangentes que se muestran corresponden a tiempos de 0.50 s, 1.50 s y 2.50 s.

Por oposición a la *velocidad media*, los físicos suelen hablar de *velocidad instantánea*, pero es un concepto que se las trae. Es el ritmo de desplazamiento que tiene un móvil en un instante determinado de tiempo. La velocidad que llevaba el automóvil a la hora, 10 minutos y 24 segundos de estar andando. La dificultad está en que la velocidad tiene que medirse en el tiempo: $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ En sentido estricto, no puede medirse en el instante, que no es una parte de tiempo sino un término o límite. No es contradictorio pensar que un móvil llegue a cierta velocidad a un lugar en un cierto instante de tiempo, y allí cambie de velocidad, saliendo a una velocidad mayor. Para un mismo instante habría una velocidad de llegada y otra de salida. Pero en la realidad física puede decirse que es imposible que ocurra pues, como veremos, supone una aceleración infinita con aplicación de fuerzas infinitas. Pueden darse cambios de velocidad muy rápidos, en muy poco tiempo, pero no en un instante. Por lo tanto, en cada lugar e instante (*hic et nunc*), si se lo mide con toda precisión, la velocidad de llegada es la misma que la de salida. Y en este sentido puede hablarse de *velocidad instantánea*.

Gráficamente, la *velocidad media* entre dos puntos de distancia y tiempo equivale a la tangente del ángulo que forma la línea recta que une dichos puntos y la horizontal. La tangente de un ángulo se calcula (¡recuerden las clases de trigonometría!) como el cateto opuesto sobre el cateto adyacente – se la llama también *pendiente* –. Si



observan el gráfico anterior, ven que equivale exactamente a la velocidad media. La *velocidad instantánea* está dada por la pendiente de la recta tangente a la curva del gráfico en el lugar e instante (*hic et nunc*) determinados. Hay que hacer ejercicios hasta familiarizarse con estos conceptos y dibujos.

3º Movimiento rectilíneo uniforme – MRU

El caso más simple de movimiento local es el de un móvil que se desplaza en línea recta a velocidad constante, el que llamaremos *movimiento rectilíneo uniforme*, y designaremos con las siglas MRU. Es el caso de un cuerpo que se mueve en el espacio fuera de toda influencia exterior, pero también podemos asimilarlo al caso de un vehículo que se desplaza sobre la tierra (a la que consideramos plana) con un impulsor o motor que compensa los factores de frenado y mantiene la velocidad constante.

Como la velocidad es constante, el espacio recorrido es directamente proporcional a la velocidad y al tiempo transcurrido; el tiempo empleado es directamente proporcional al espacio recorrido e inversamente proporcional a la velocidad; y la velocidad puede calcularse conociendo el espacio recorrido en cualquier lapso de tiempo. Tenemos, entonces, las siguientes relaciones, que nos permiten calcular espacio, tiempo o velocidad teniendo los otros dos datos:

$$e = v \times t \qquad t = \frac{e}{v} \qquad v = \frac{e}{t}$$

Teniendo en cuenta que algunos movimientos más complejos pueden descomponerse en varios movimientos simples que respondan a las condiciones del MRU, con un poco de ingenio y método, se pueden resolver matemáticamente muchos problemas relativos al movimiento de cuerpos. Por ejemplo, si dos trenes salen a la vez, uno de Retiro a 90 km/h y el otro de Mendoza a 75 km/h, por la misma vía, ¿en qué lugar e instante se cruzan? Entre ambas terminales hay 1.100 km de distancia. Es importante saberlo para hacer oportunamente el cambio de vía. ¿Cómo se resuelve? Se puede plantear de diversas maneras:

A) La distancia recorrida por el tren porteño es: e_p = 90 km/h x t, y la del tren mendocino es: e_m = 75 km/h x t. En el tiempo en que ambas distancias sumen los 1.100 km que los separaban, ambos trenes se encuentran:

$e_p + e_m$ = 1.100 km ⇒ 90 km/h x t + 75 km/h x t = 1.100 km ⇒ $t = \frac{1100\ km}{90km/h+75km/h}$ = 6,67 h (6 h 40')

B) Como los trenes se acercan con velocidades opuestas, recorren el espacio que los separa con una velocidad total que es la suma de ambas velocidades. Por lo tanto, el tiempo que tardan en encontrarse es:

$t = \frac{e}{vp+vm}$ ⇒ $t = \frac{1100\ km}{90km/h+75km/h}$ ¡Se va más rápido a la solución!

Conociendo el tiempo que tardan en encontrarse, ya podemos saber fácilmente cuánto ha recorrido cada tren: $e = v \times t$ ⇒ e_p = 90 km/h x 6,67 h = 600 km e_m = 75 km/h x 6,67 h = 500 km

C) Hay un modo de llegar más pronto a conocer el lugar, que puede ser lo que más importe al ferroviario. El que va a más velocidad, va a recorrer proporcionalmente más espacio, de manera que la proporción de velocidades tiene que ser semejante a la proporción de espacios recorridos: $\frac{vp}{vm} = \frac{ep}{em}$ Y como sabemos que la suma de fracciones de espacio debe dar el espacio total: $e_p + e_m = e_t$ = 1.100 km, podemos fácilmente calcular:

$$ep = em \times \frac{vp}{vm} = (et - ep) \times \frac{vp}{vm} \Rightarrow ep\ (1 + \frac{vp}{vm}) = et \times \frac{vp}{vm} \Rightarrow ep = et \times \frac{vp/vm}{1+vp/vm} = 1100\ km \times 0.5454 = 600\ km$$

Como se puede observar, si las velocidades de los dos trenes son iguales, el factor $\frac{vp/vm}{1+vp/vm}$ da ½, pues cada tren recorre mitad de camino; si v_p es mucho más grande, el factor tiende a 1 (si es mil veces mayor da: $\frac{1000}{1+1000} = 0{,}999$), lo que significa que el tren porteño recorre casi todo el camino mientras el mendocino duerme la siesta; si v_p es muy pequeña, pasa a la inversa, pues el factor tiende a 0 (si es mil veces menor da: $\frac{0{,}001}{1+0{,}001} = 0{,}000999$). Un físico que disfrute de las matemáticas tiene con qué divertirse.

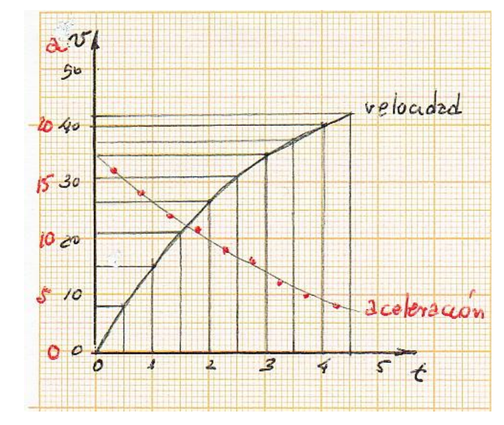
4º Aceleración

Cuando un móvil aumenta su velocidad, decimos que *acelera*, y cuando disminuye *desacelera*. La *aceleración*, entonces, es el aumento de velocidad de un móvil en el tiempo, y su contrario es la *desaceleración*, que es la disminución de la velocidad en el tiempo.

La aceleración es un concepto que tiene semejanza con la velocidad, pues podemos decir que *la aceleración es a la velocidad* del móvil, *como la velocidad al lugar*. Porque así como la velocidad es el ritmo de variación del lugar de un móvil, la aceleración es el ritmo de variación de la velocidad del móvil. De allí que, así como pudimos medir las diferentes velocidades de los móviles comparándolas entre sí respecto del primer movimiento, esto es, respecto del tiempo (que es la medida o número del primer movimiento), así también podemos hacer con la aceleración:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \sim a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

Por ejemplo, si un automóvil arranca al ponerse el semáforo en verde y al cabo de 4 sg llega a 40 km/h, podemos decir que la aceleración fue: $a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{40km/h}{4sg} = \frac{\frac{10km}{h}}{sg}$ Esto significa que, en promedio, el automóvil aumentó su velocidad en 10 km/h cada segundo. Quizás aumentó 15 km/h en el primer segundo, 12 en el segundo, 8 en el tercero y 5 en el cuarto segundo, pero lo que calculamos fue la *aceleración* promedio o *media*. Si nuestro automóvil contara con un velocímetro que registra la velocidad cada medio segundo (últimamente hay modelos con sistemas digitales que hacen todas estas cositas), podríamos hacer un cálculo más preciso, dando la aceleración media para cada una de las mitades de segundo (ver gráfico). Podemos hablar también de aceleración instantánea con las mismas precauciones que para la velocidad, es decir, teniendo en cuenta que ni la velocidad ni la aceleración pueden definirse propiamente en el instante, sino en un intervalo de tiempo pequeño. Si en un instante la velocidad cambiara abruptamente y no de manera continua, el valor de la aceleración tendería a infinito. Pero como físicamente son cosas que no se pueden dar, podemos hablar de una aceleración para cada instante, lo que quedaría graficado por la línea de aceleración en el gráfico.



Hay también un problema de unidades. La velocidad se mide como diferencias de lugar por unidad de tiempo, pudiendo medirse las diferencias de lugar en m o km o cualquier otra unidad conveniente, y el tiempo en horas, segundos o cualquier otra (los continentes se mueven a velocidades que conviene medirlas en cm/año). La aceleración se mide como diferencias de velocidad por unidad de tiempo. En

el ejemplo dado medimos la velocidad en km/h y el tiempo en sg. Pero para manejarse con los cálculos sin complicaciones, que son fuente de errores, conviene unificar las unidades de tiempo que se toman para la velocidad y para la aceleración, de manera que no se usen horas y segundos, sino sólo horas o sólo segundos. Como sabemos que la hora tiene 3.600 segundos, conviene llevar la aceleración media que calculamos a m y sg o a km y h:

$$10\ km/h/sg = 36.000\ km/h^2 = 2{,}78\ m/sg^2$$

La unidad de tiempo aparece doble (elevada al cuadrado) porque interviene primero para la velocidad y luego de nuevo para la aceleración. La noción de aceleración, entonces, pertenece a la experiencia común, sobre todo en la vida moderna, pero la unidad con que se mide no es nada común en el lenguaje ordinario.

La *desaceleración* corresponde a la disminución de velocidad, como cuando se aplican los frenos en un automóvil o el avión pone las turbinas a la inversa en el aterrizaje. En la vida ordinaria distinguimos aceleración y desaceleración porque en general sus causas y efectos son distintos: en la aceleración apuramos el motor y nos tira hacia atrás, en la desaceleración ponemos los frenos y nos tira hacia adelante. Pero en la investigación científica las cosas cambian un poco, tanto al investigar las causas de modo más general, como es propio del científico, como al establecer las maneras de medirla. Podría pensarse que basta decir que la aceleración se mide con números positivos y la desaceleración con números negativos. Esto sería válido si no tuviéramos en cuenta la velocidad, sino la rapidez, esto es, la magnitud de la velocidad sin referencia a la dirección. Pero si tenemos en cuenta que la velocidad en dirección creciente de x es positiva, y la velocidad en dirección decreciente es negativa, resulta (comprobarlo con las fórmulas) que para velocidades positivas la aceleración es positiva y la desaceleración es negativa, pero para velocidades negativas (de dirección contraria) da al revés: la aceleración es negativa y la desaceleración es positiva. ¡Qué complicación! Además, si tenemos un vehículo espacial con velocidad positiva, y lo frenamos con un chorro de gases en sentido contrario, si se mantiene este impulso, primero lo frena y luego la acelera en la dirección contraria, siempre al mismo ritmo de variación de velocidad, como se ve en el gráfico. Aquí vemos que la desaceleración inicial (hasta llegar a cero) como la aceleración subsiguiente (en que aumenta la velocidad en sentido contrario) tienen una misma causa y un mismo ritmo de cambio. Por lo que comprobamos que también para la aceleración nos conviene hablar de *dirección*:

- tenemos *aceleración positiva*, es decir, con dirección en x creciente, cuando aceleramos velocidades positivas o desaceleramos velocidades negativas;
- tenemos *aceleración negativa*, es decir, con dirección en x decreciente, cuando desaceleramos velocidades positivas o aceleramos velocidades negativas (caso del gráfico).

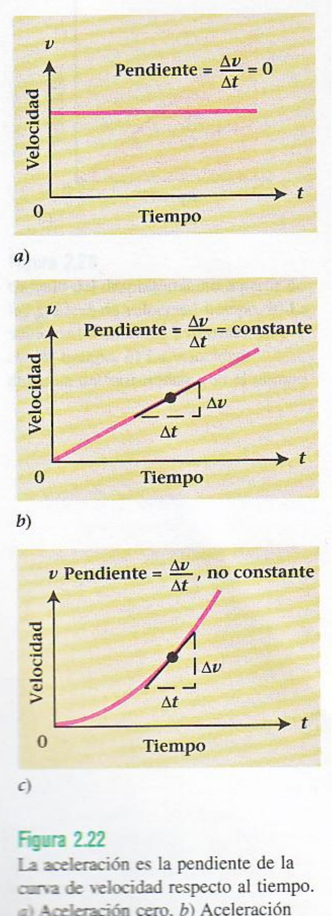


Figura 2.22 La aceleración es la pendiente de la curva de velocidad respecto al tiempo. *a)* Aceleración cero. *b)* Aceleración constante distinta de cero. *c)* Aceleración variable.

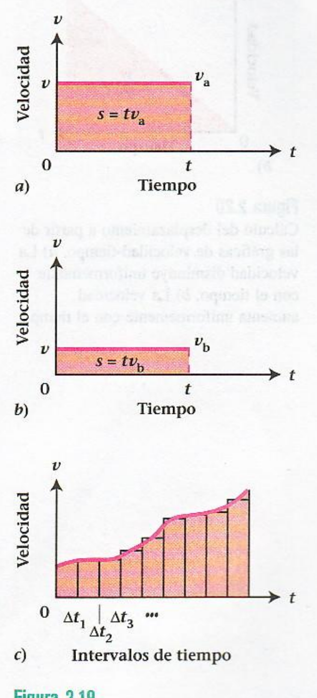


Figura 2.19 Gráficas de velocidad respecto al tiempo para tres objetos en movimiento: *a)* y *b)* velocidad constante; *c)* velocidad variable en el tiempo. El área bajo la curva de velocidad es equivalente al desplazamiento del objeto durante el intervalo de tiempo.

Así como la velocidad, la aceleración es una magnitud con dirección: $\vec{a}$

De aquí se sigue que, así como en un gráfico de espacio y tiempo, la velocidad está dada por la pendiente en cada punto; así también, en un gráfico de velocidad y tiempo, la aceleración está dada por la pendiente en cada punto. Cuando la pendiente es creciente, la aceleración es positiva, cuando es decreciente, la aceleración es negativa.

Un problema interesante para los movimientos de velocidad variable (acelerados), es calcular el espacio recorrido en función del tiempo. Supongamos que medimos la velocidad de un móvil cada segundo, con lo que podemos realizar un gráfico de velocidad en función del tiempo. Una manera aproximada de calcular el espacio recorrido, es suponer que en cada segundo el móvil se ha movido a una velocidad constante igual al promedio de la velocidad inicial y final de ese segundo, que son las que se tienen medidas: $\Delta e_3 = \frac{v_3+v_2}{2} \times \Delta t_3$ donde Δt_3 es el tercer segundo del movimiento, Δe_3 es el espacio aproximado recorrido en ese tercer segundo y $\frac{v_3+v_2}{2}$ es la velocidad promedio durante ese segundo de movimiento, calculada sumando la velocidad inicial (la del segundo segundo) y la velocidad final (la del tercer segundo) y dividiendo por dos. Si luego vamos sumando los espacios recorridos en cada segundo transcurrido, tenemos el cálculo aproximado del espacio en función del tiempo. Mientras más pequeños sean los intervalos de tiempo en que medimos las velocidades, más exacto es nuestro cálculo. Si observamos lo hecho en el gráfico de velocidad y tiempo, es fácil darse cuenta que el espacio recorrido equivale al área bajo la línea de velocidad.

5º Movimiento rectilíneo uniformemente acelerado – MRUA

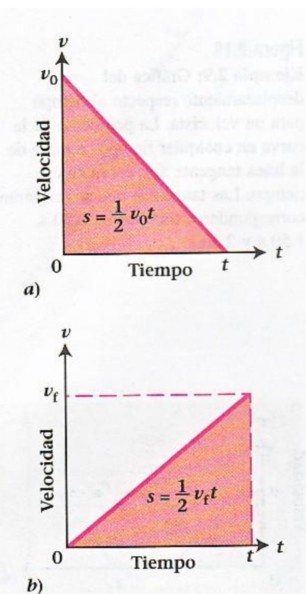


Figura 2.20
Cálculo del desplazamiento a partir de las gráficas de velocidad-tiempo. *a)* La velocidad disminuye uniformemente con el tiempo. *b)* La velocidad aumenta uniformemente con el tiempo.

El caso más simple de movimientos rectilíneos acelerados, es cuando la aceleración es constante, al que llamaremos *movimiento rectilíneo uniformemente acelerado* – MRUA. En el MRU la velocidad es constante, mientras que en el MRUA es constante la aceleración. El aumento de velocidad, entonces, será proporcional al tiempo transcurrido: a doble tiempo, doble aumento de velocidad. Puesto que la aceleración responde a la siguiente relación: $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ se sigue que la velocidad será función del tiempo según la siguiente ecuación: $v = v_0 + a \times t$ donde v_0 es la velocidad inicial. Tenemos, entonces, las siguientes relaciones:

$$v = v_0 + a \times t \qquad a = \frac{v - v_0}{t} \qquad t = \frac{v - v_0}{a}$$

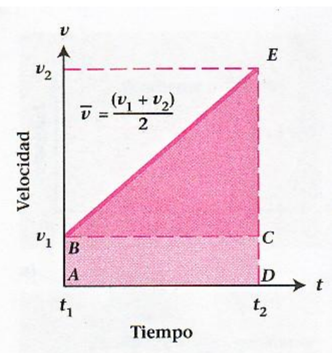
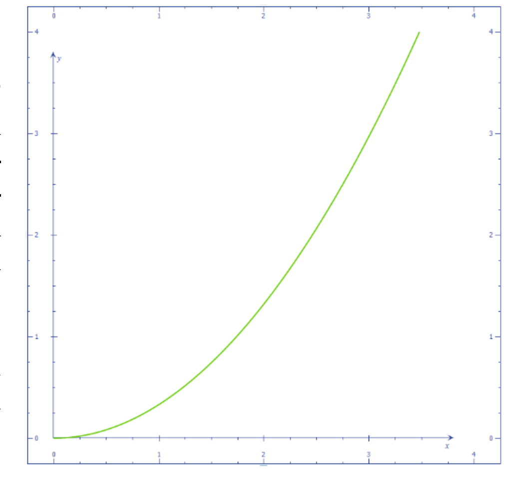


Figura 2.24
Gráfica de velocidad-tiempo para aceleración constante, partiendo con una velocidad inicial $v_1 \neq 0$.

Es interesante calcular el espacio recorrido en el MRUA. Lo podemos hacer teniendo en cuenta lo que dijimos del espacio para cualquier movimiento acelerado: es igual al área bajo la línea de velocidad. Como la variación es constante de una velocidad inicial v_0 a una velocidad final v_f, el espacio recorrido es igual al que habría recorrido un móvil con MRU que tuviera una velocidad media: $e = \frac{v_o+v_f}{2} \times t$ Si tenemos en cuenta que la aceleración es: $a = \frac{v_f-v_0}{t}$ podemos hallar el espacio en relación a la velocidad inicial, a la aceleración y al tiempo: $v_f = v_o + a \times t \quad \Rightarrow \quad e = \frac{v_o+v_o+a\times t}{2} \times t$

$$\Rightarrow \quad e = v_0 \times t + ½\, a \times t^2$$



Para el caso en que la velocidad inicial es nula, el espacio recorrido es: $e = \frac{1}{2}at^2$ Depende doblemente del tiempo porque con el tiempo aumenta el espacio en razón de la velocidad, y con el tiempo aumenta también la velocidad en razón de la aceleración. Gráficamente, la línea del espacio en función del tiempo en el MRUA describe una parábola. En el gráfico de la derecha el eje y mide espacio en metros, el eje x tiempo en segundos y la aceleración es de 0,66 m/sg^2. En este caso es sencillo calcular el tiempo en función del espacio: $t = \sqrt{\frac{2e}{a}}$

En el caso en que la velocidad inicial no sea nula, el cálculo del tiempo en función del espacio, de la velocidad inicial y de la aceleración supone la resolución de una ecuación de segundo grado:

$$\frac{a}{2}t^2 + v_0 t - e = 0$$

Recordemos la solución de las ecuaciones de segundo grado:

$$ax^2 + bx + c = 0 \quad \Rightarrow \quad x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Tenemos entonces: $t = \frac{\sqrt{v_0^2 + 2ae} - v_0}{a}$

También puede ser conveniente conocer la relación de la velocidad con la aceleración y la distancia sin necesidad de conocer el tiempo. Si tenemos en cuenta que: $v = v_0 + at$ y que de la ecuación del tiempo se sigue que: $= v_0 + at = \sqrt{v_0^2 + 2ae}$ nos queda: $v = \sqrt{v_0^2 + 2ae}$

En las relaciones de MRUA se conjugan, entonces, cuatro parámetros: el espacio y el tiempo, la velocidad y la aceleración. Como se trata de un movimiento, interesa determinar cuál es el estado final del móvil, o término *ad quem*, respecto del estado inicial o término *a quo*. El término *a quo* está caracterizado, por lo tanto, por los cuatro parámetros iniciales: x_0, t_0, v_0, a_0, y el término *ad quem* por esos mismos cuatro parámetros en su valor final: x_f, t_f, v_f, a_f, que han variado siguiendo las proporciones del MRUA. La condición de esta especie de movimiento es que la aceleración se mantiene constante en el tiempo: $a_f = a_0$. El tiempo varía según la relación de este movimiento con el primer movimiento. La velocidad crece o decrece de manera constante en función del tiempo. El desplazamiento depende por doble razón del tiempo, por lo que crece y decrece parabólicamente. En las ecuaciones planteadas hemos supuesto siempre que el espacio y el tiempo se miden con el comienzo del movimiento, es decir, que $x_0 = 0$ y $t_0 = 0$. Si así no fuera, en todas las fórmulas dadas hay que reemplazar e por $\Delta x = x - x_0$ y t por $\Delta t = t - t_0$. Si en un movimiento de este tipo se determina el valor inicial y final de dos de estos parámetros, los dos restantes quedan determinados según las ecuaciones dadas. De allí que cada uno de estos parámetros puede ser calculado si se da la variación de otros dos de los tres parámetros restantes. Como hay tres maneras de combinar un par de tres cosas distintas, tendremos tres ecuaciones posibles para cada uno de los parámetros del MRUA:

Ecuaciones cinemáticas para Movimiento Uniformemente Acelerado			
Incógnita	**En función de otros dos parámetros**		
Aceleración	$a = \frac{v - v_0}{t}$	$a = \frac{2}{t}(\frac{e}{t} - v_0)$	$a = \frac{v^2 - v_0^2}{2e}$
Velocidad	$v = v_0 + at$	$v = 2\frac{e}{t} - v_0$	$v = \sqrt{v_0^2 + 2ae}$
Espacio	$e = v_0 t + ½\, at^2$	$e = \frac{v_0 + v}{2} t$	$e = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}$
Tiempo	$t = \frac{v - v_0}{a}$	$t = \frac{2e}{v_0 + v}$	$t = \frac{\sqrt{v_0^2 + 2ae} - v_0}{a}$

6º Movimientos de caída libre

Las ecuaciones del MRUA son muy interesantes, pero en la realidad física del hombre parece no darse nunca el caso de este movimiento. El esfuerzo necesario para acelerar un vehículo, ya sea un automóvil, un avión o una nave espacial, aumenta con la velocidad, por lo que no hay sistema motriz que sea capaz de sostener mucho tiempo una aceleración constante. Cualquier automóvil pasa de 20 a 50 km/h en pocos segundos, pero para pasar de 120 a 150 km/h en pocos segundos, es necesario un motor poderosísimo que devora el combustible. Todos los motores parecen tener una velocidad máxima, y la aceleración que imprimen parece disminuir proporcionalmente a la diferencia con esa velocidad máxima:

$$a = a_0(1 - \frac{v}{v_{max}})$$ [1]

[1] Se estudia la posibilidad de impulsar las sondas espaciales con «viento solar», que sería el debilísimo impulso que la luz parece poder dar a una pantalla. Aunque el impulso es extremadamente débil, tiene la ventaja de tener como velocidad máxima a la misma velocidad de la luz. Aquí el problema es que la intensidad de la luz disminuye con la distancia.

En cuanto a los sistemas de frenado, tampoco parecen responder nunca a las condiciones de desaceleración constante. Si se frena con un medio elástico, como un resorte, la aceleración de frenado aumenta con la compresión. Si un vehículo se frena con un paracaídas, la desaceleración disminuye con la velocidad. Quizás el sistema de frenado de los automóviles se acerque al caso de desaceleración constante, pero las condiciones físicas del frenado a alta velocidad son enormemente distintas que a baja.

Figura 2.27
Reconstrucción del experimento de Galileo acerca del movimiento acelerado. La distancia recorrida por la bola descendiendo por el plano es proporcional al cuadrado del tiempo que transcurre.

La caída libre de los cuerpos no pareció a los físicos, durante mucho tiempo, que fuera una excepción a lo dicho. Los cuerpos pesados se veían caer más rápido que los livianos, pero ambos, más pronto o más tarde, llegaban a una velocidad máxima de caída. Unas mediciones llevadas a cabo por Galileo, a partir de 1604, con bolas rodando por planos inclinados, le permitieron comprobar dos reglas:

- las distancias recorridas por el cuerpo que cae son proporcionales al cuadrado del tiempo transcurrido: $x \propto t^2$;
- el movimiento no depende del peso del cuerpo, es decir, bolas más pesadas o más livianas caían a la misma velocidad.

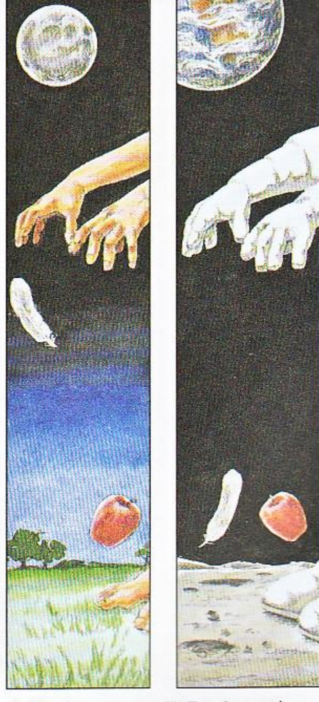
Tabla 2.2 ***Resultados de Galileo para una bola rodante que desciende por un plano inclinado***

Tiempo t (intervalos iguales)	t^2	Distancia x (puntos)	x/t^2
1	1	33	33.0
2	4	130	32.5
3	9	298	33.1
4	16	526	32.9
5	25	824	33.0
6	36	1192	33.1
7	49	1620	33.1
8	64	2104	32.9

Las distancias se midieron en puntos, unidad que es igual a 29/30 mm.
Fuente: Este experimento lo describe Stillman Drake, "The Role of Music in Galileo's Experiments", en *Scientific American*, junio 1975, p. 98.

Hoy es sencillo hacer estas mediciones con mucha precisión gracias a las cámaras de fotos de alta velocidad, que llegan a sacar un millón de fotos por segundo.

Estos resultados llevaron a pensar que, si se veía caer más rápido a los cuerpos más pesados, ocurría porque el aire frenaba más eficazmente a los cuerpos más livianos. Unos treinta años después, Roberto Boyle, que había inventado la bomba de vacío, comprobó que sin aire, una pluma y una manzana caen a la misma velocidad. Este mismo experimento fue repetido por un astronauta en la luna, en 1971, dejando caer una pluma y un martillo.



a) En aire *b*) En el espacio sin aire

Figura 2.28
Una manzana y una pluma se dejan caer simultáneamente desde la misma altura. *a*) La pluma cae más lentamente que la manzana por causa de los efectos del aire. *b*) La pluma y la manzana caen a la misma velocidad cuando se dejan caer en el espacio sin aire sobre la Luna.

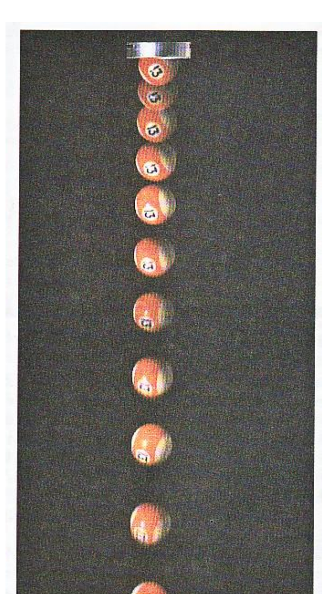


Figura B2.2 Fotografía de destellos múltiples de alta velocidad de una bola de billar que cae libremente.

Que el espacio recorrido en caída libre sea proporcional el cuadrado del tiempo nos permite ver que se trata de un movimiento de aceleración constante, que para el caso de velocidad inicial nula tenemos: $x = \frac{a}{2}t^2$

La conclusión no deja de tener algo sorprendente: todos los cuerpos, independientemente de su peso, e independientemente también de la velocidad que vayan alcanzando, caen con la misma aceleración. Claro que esto se cumple solamente en el vacío, de allí que no fuera un fenómeno manifiesto para la experiencia cotidiana de los hombres.

La aceleración en caída libre o aceleración de la gravedad tiene el siguiente valor: g = 9,81 m/sg^2. Esto nos dice que en cada segundo la velocidad aumenta 9,81 m/sg, es decir, 35,3 km/h. Una piedra y una pluma que caen en el vacío, a los 3 sg alcanzan más de 100 km/h, y en un minuto de caída tienen 2.120 km/h. Rápido.

Las ecuaciones más útiles para caída libre, suponiendo que la velocidad inicial es nula, son las siguientes:

Ecuaciones cinemáticas para Caída Libre			
$v = gt$	$v = \sqrt{2gx}$	$x = ½\, gt^2$	$t = \sqrt{\frac{2x}{g}}$

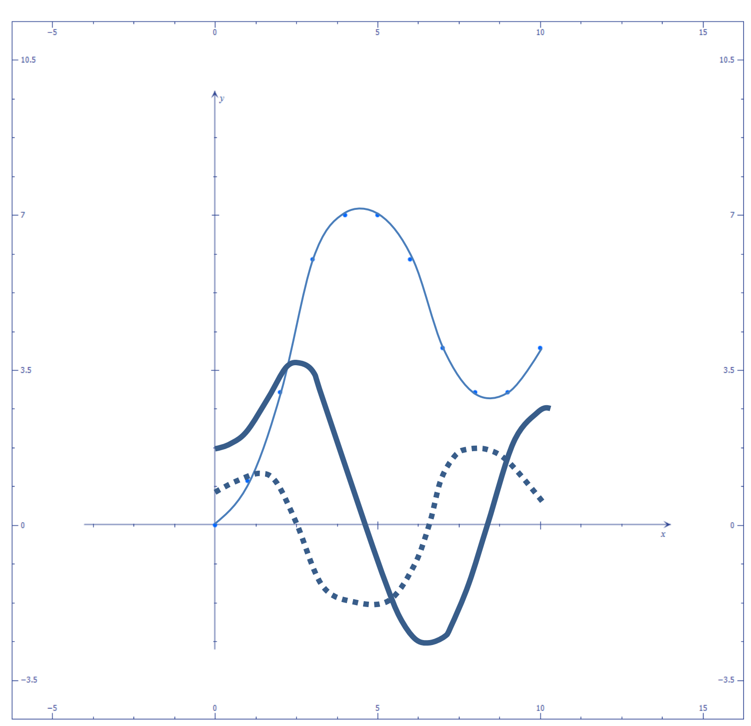
Ya volveremos sobre este asunto, por lo que no lo desarrollaremos más.

7º Movimientos rectilíneos variados

Hasta ahora hemos considerado las variaciones de espacio, tiempo, velocidad y aceleración en movimientos que tienen cierta constancia, ya sea la velocidad constante o la aceleración. Pero los movimientos de las cosas, tanto naturales como artificiales, suelen tener mil variaciones. De todos modos, siempre la aceleración mide las variaciones de velocidad, y la velocidad las variaciones de lugar, por lo que siempre son parámetros asociados. De allí que, si en un movimiento medimos con precisión los lugares en función del tiempo, o las velocidades, o las aceleraciones, podemos calcular los otros valores. Esto puede hacerse numéricamente, por medio de tablas, o gráficamente.

Si tenemos una tabla de valores de desplazamiento en función del tiempo (x_i, t_i), donde i va de 0 (lugar y tiempo inicial) a n (lugar y tiempo final), podemos calcular la velocidad promedio en cada uno de los intervalos de tiempo: $v_i = \frac{x_i - x_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}$ Una vez establecida una nueva tabla de las velocidades promedio para cada intervalo de tiempo, podemos calcular las aceleraciones promedio de manera similar: $a_i = \frac{v_i - v_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}$

Como se supone que los movimientos no son discontinuos y de a saltos (salvo que se esté midiendo el movimiento de una langosta), pueden hacerse estimaciones de valores intermedios y hacer cálculos aproximados más finos de la velocidad y aceleración. Esto puede verse más claramente en un gráfico. Si se grafican los valores de la tabla de desplazamientos en función del tiempo, luego puede trazarse una línea continua que una dichos puntos, estimando de alguna manera los valores intermedios. Como se señaló más arriba, la velocidad puede calcularse gráficamente para cada punto por el valor de la pendiente de la recta tangente a la línea graficada (la línea gruesa da los valores de velocidad). Calculando las pendientes en la gráfica de velocidad puede calcularse la aceleración para cada punto (línea de puntos).



Hoy, con instrumentos electrónicos y sistemas digitales, podemos tener medidores y graficadores prácticamente instantáneos de distancia, velocidad y aceleración para cualquier vehículo.

II. Movimientos de traslación en un plano

1º Desplazamientos en un plano

Al tratar de la cantidad, distinguimos sus dos especies: cantidad continua y cantidad discreta, y dijimos que la mensura se da propia y primeramente en la cantidad discreta, trasladándose luego a la cantidad continua. Señalamos allí dos diferencias principales: que la magnitud continua no tiene una unidad natural sino convencional, y que siempre toda unidad puede dividirse en partes. Ahora tenemos que referirnos a otra diferencia: que la cantidad continua tiene *posición*. “Ciertas cantidades – dice Aristóteles – se forman de cosas cuyas partes tienen entre sí una relación de posición, y otras se forman de cosas cuyas partes no tienen posición. Así las partes de la línea tienen, las unas con relación a las otras, una posición, porque cada una de ellas está colocada en un lugar

distinto; y podría decirse e indicarse precisamente dónde está puesta en el plano, y con qué otra parte se une. En igual forma las partes del plano tienen cierta posición, y podría decirse igualmente respecto de cada una de ellas el lugar preciso que ocupa, e indicar las que se unen con otras. Y lo mismo puede decirse de las partes del sólido y de las partes del espacio. Con respecto al número sucede todo lo contrario; sería imposible mostrar, ni cómo sus partes tienen entre sí una relación de posición, ni dónde están, ni cómo se ligan las unas con las otras. La misma dificultad se produce respecto a las partes del tiempo; porque ninguna de las partes del tiempo es permanente. Ahora bien; ¿lo que no es permanente puede tener una posición? Podría decirse más bien que las partes del tiempo tienen entre sí un cierto orden, puesto que en el tiempo esta parte es anterior y aquella otra posterior. Lo mismo sucede con el número, puesto que el uno va antes que el dos, y el dos antes que el tres. Esto es, si se quiere, una especie de orden, pero no una posición. Por último, lo mismo sucede con las palabras. Ninguna de sus partes es permanente. Una vez pronunciadas, no es posible recogerlas, de suerte que no es posible posición alguna respecto de estas partes, puesto que no son permanentes"[1].

Como observa Aristóteles, la cantidad continua tiene posición, mientras que la discreta no. Ésta puede tener orden en cuanto se la numera, pero no propiamente posición. Es interesante comprobar que, aunque el tiempo es una magnitud continua, sin embargo no tiene posición, y Aristóteles cree hallar la razón en que sus partes no permanecen.

Ahora bien, la cantidad continua puede numerarse, de manera que la longitud puede ser de 2 o 3 metros, y la superficie de 3 o 4 hectáreas. Y si se numera, puede sumarse y restarse, multiplicarse y dividirse. Sí, pero con cuidado, pues tiene *posición*. Cuando sumo dos manzanas a dos manzanas obtengo cuatro, ni más ni menos. Pero cuando sumo una distancia de dos metros a otra de dos metros, no siempre obtengo cuatro metros, pues puede ser que siga con dos. ¿Cómo? Si a una distancia en línea recta de 2 m le agrego otra recta de 2 m que forme un ángulo de 60º con la primera, la distancia entre el punto inicial de la primera y el final de la segunda sigue estando a 2 m, porque forman los lados de un triángulo equilátero. Y algo semejante puede pasar con las superficies, pues si a un triángulo equilátero le sumo otros dos, de manera que formen un cono piramidal, la superficie formada por sus extremos libres es otro triángulo igual, base de la pirámide.

Si ahora no sólo tenemos en cuenta distancias, sino desplazamientos locales, no sólo hay que aclarar cuál es la posición del desplazamiento, sino también su sentido. No basta decir que un vehículo recorrió 10 km, sino que hay que decir en qué posición los recorrió; y no basta aclarar la posición: Norte-Sur, sino también el sentido en que la recorrió: ¿de Norte a Sur o de Sur a Norte?

A la hora, entonces, de describir un movimiento local, no basta referir la magnitud absoluta de la distancia recorrida: 10 km, sino que hay que señalar la posición sucesiva de los lugares ocupados entre los extremos del movimiento A y B (si fue en línea recta, curva, o como haya sido), y el sentido del movimiento: si de A a B o de B a A. Estos requerimientos especiales de las magnitudes de desplazamientos locales, que se trasladan de alguna manera a la velocidad, que es el ritmo de desplazamiento, y por lo tanto también a la aceleración, que es el ritmo de variación de la velocidad, llevaron a los físico-matemáticos a desarrollar la doctrina general de las *magnitudes vectoriales*.

2º Magnitudes vectoriales

Hay muchas magnitudes físicas que pueden medirse y numerarse al modo de las cantidades discretas, determinadas por el valor absoluto de un número. A éstas las suelen llamar *magnitudes escalares*, pues se caracterizan por una simple escala o escalera ordenada de valores. Así se mide la distancia, el tiempo, la rapidez (que distinguimos de la velocidad), la masa, la temperatura, etc. Pero hay otras magnitudes físicas que no pueden describirse con una simple escala de intensidad, sino que tienen además *dirección* – noción en la que incluimos la posición y el sentido –, como el desplazamiento y todas las demás magnitudes que se le asocian: velocidad y aceleración, fuerza y momento (como veremos), etc. Cuando estas magnitudes responden a ciertas reglas generales, que ahora señalaremos, se las denomina *magnitudes vectoriales*, pues se determinan por lo que se define como *vector*:

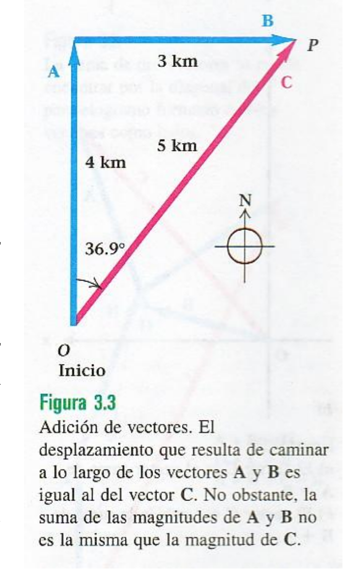


Figura 3.3
Adición de vectores. El desplazamiento que resulta de caminar a lo largo de los vectores **A** y **B** es igual al del vector **C**. No obstante, la suma de las magnitudes de **A** y **B** no es la misma que la magnitud de **C**.

- Así como los escolásticos distinguen el *número numerado*, que es un número de cosas de naturaleza determinada, número de manzanas o de

[1] Aristóteles, *Categorías*, capítulo 6, traducción de F. Larroyo, en *Tratados de Lógica*, ed. Porrúa, México 1972, p. 29-30.

metros (propio de los físicos), del *número numerante*, que es el número que abstrae de la naturaleza de las cosas que numera, como tres o cinco (propio de los matemáticos),

- así ahora distinguimos las *magnitudes vectoriales*, que son cantidades con dirección de naturaleza determinada, por lo que se refieren a cierta unidad, de los *vectores*, que son estas cantidades direccionales en cuanto abstraen de la naturaleza de las cosas medidas.

El estudio de los vectores es un capítulo de las matemáticas que luego se aplica a la física.

Los vectores se determinan por una cantidad absoluta, siempre positiva, y una dirección, que supone posición y sentido. Evidentemente, como lo iremos comprobando, son nociones que tienen que ver con el movimiento local, porque la cantidad con posición es lo propio de la extensión y del lugar, y el sentido supone movimiento, única realidad que pone orden de *a quo* y *ad quem* en la cantidad. Los vectores, a la manera de las formas y figuras, son propiedades de la cantidad continua, de manera que siempre la tienen como sujeto inmediato. Considerados en sí mismos, abstractamente, no dependen del lugar, siendo lo mismo así se apliquen aquí o allá mientras mantengan la misma magnitud y dirección, como también se hace en matemática con el triángulo o el cuadrado.

Los vectores pueden representarse gráficamente con una flecha, cuya recta determina la posición, la punta de la flecha el sentido y el largo de la flecha la cantidad absoluta. Para determinarlos numéricamente puede usarse un sistema de coordenadas cartesianas o de coordenadas polares.

La condición para que una magnitud física pueda considerarse vectorial, es que pueda sumarse y restarse como ahora definiremos que se hace con los vectores. Téngase en cuenta que las cosas físicas no siempre se suman y restan tranquilamente como hacen los matemáticos, pues 2 manzanas más 2 manzanas hacen 4, y si 2 salen $ 10, 4 salen $ 20. Pero si las dos primeras son más ricas que las dos segundas, ya nadie está de acuerdo con las cuentas. Algo semejante pasa con los vectores. La suma y resta de vectores se entiende a la manera de una suma y resta de desplazamientos (que son la aplicación primera de estas nociones). El algo se desplaza 4 km en una dirección y luego 3 km en ángulo recto, el desplazamiento final, si sólo se tiene en cuenta la distancia del punto de inicio, es de 5 km en dirección oblicua. Si llamo A al primer desplazamiento, B al segundo y C al desplazamiento final, ¿todo el mundo está de acuerdo en que A + B = C? Para el que camina cargado no es igual, porque si hace primero A y

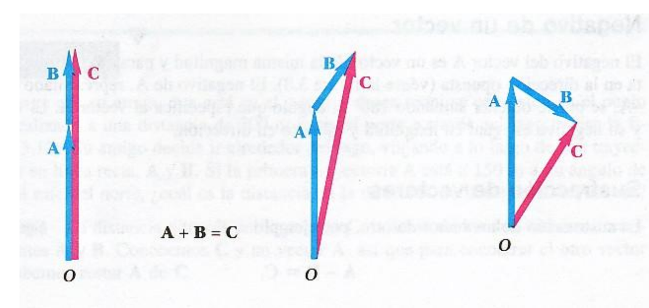


Figura 3.4
Variaciones en la magnitud y la dirección. Si los vectores **A** y **B** son de magnitud constante, pero su dirección cambia, entonces la magnitud y dirección de **C** también cambia.

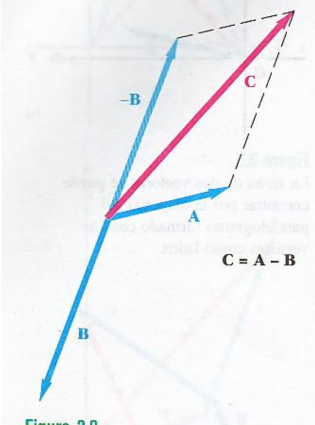


Figura 3.9
Sustracción de vectores. Podemos obtener la diferencia entre dos vectores como **A** y **B** sumando el primer vector al negativo del segundo.

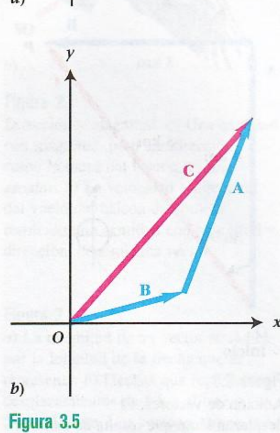


Figura 3.5
a) El vector **C** es el vector suma de **A** + **B**.
b) El vector **C** es también la suma de **B** + **A**.

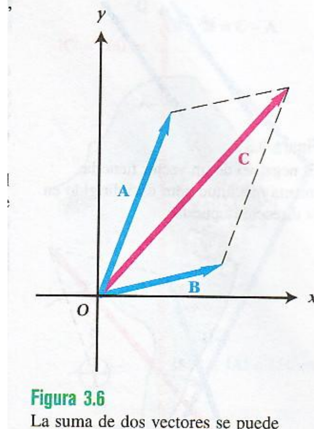


Figura 3.6
La suma de dos vectores se puede encontrar por la diagonal del paralelogramo formado con los vectores como lados.

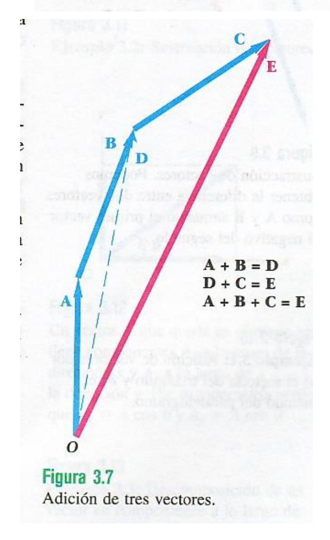


Figura 3.7
Adición de tres vectores.

luego B, camina 7 km, mientras que si hace C, camina sólo 5 km. El ciclista puede preferir A + B si son caminos asfaltados y C es campo a traviesa. A + B es igual a C sólo si lo único que se tiene en cuenta es el término final, y no se tiene en cuenta el recorrido y sus condiciones. Cada vez que se quiera considerar si una magnitud física puede considerarse vectorial, hay que tener en cuenta si es legítimo, desde el punto de vista del problema físico que se considera, considerar que se suman como se ha dicho.

Así como hay tres maneras de llegar al desplazamiento C que es suma de dos desplazamientos A y B: 1) yendo por A y luego por B; 2) yendo por B y luego por A; 3) yendo directamente por C; así hay también tres maneras de sumar gráficamente dos vectores A y B: los dos primeros siguen el *método del triángulo*, y el tercero sigue el *método del paralelogramo*, como se ve en las figuras. Y así como se suman dos, pueden sumarse sucesivamente tres y más vectores.

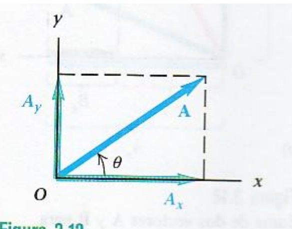
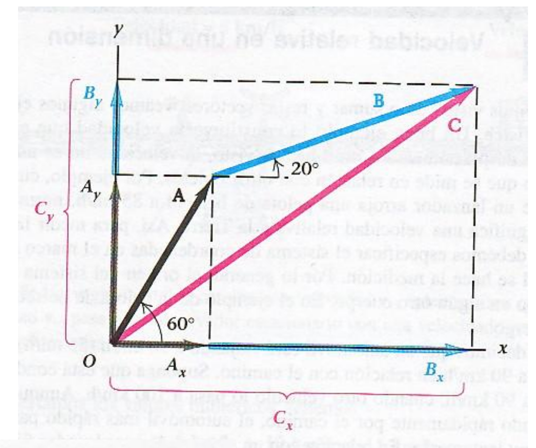


Figura 3.12
Un vector **A** que queda en el plano *xy* tiene componentes A_x a lo largo de la dirección *x* y A_y a lo largo de la dirección *y*. Por trigonometría vemos que $A_x = A \cos \theta$ y $A_y = A \text{ sen } \theta$.

Podemos hacer *sustracción* de vectores si se tiene en cuenta que el negativo de un vector es otro vector de igual magnitud y posición pero de sentido contrario. Siguiendo los mismos procedimientos podemos *multiplicar* y *dividir* vectores, de manera que 3A es un vector con la misma dirección de A pero con una magnitud tres veces mayor, A/3 con una magnitud tres veces menor.

Otro procedimiento interesante es la *descomposición* de vectores. Así como dos vectores A y B se suman o componen en otro C, así también se entiende que cualquier vector C puede descomponerse en otros dos A y B. La descomposición se hace especialmente útil cuando descomponemos un vector A en dos vectores perpendiculares según los ejes cartesianos x, y: $A = A_x + A_y$. Como se ve en la figura, si tenemos en cuenta el ángulo θ que forma el vector con el eje x, por trigonometría tenemos que: $A_x = A \cos \theta$ y $A_y = A \text{ sen } \theta$. También tenemos, por el teorema de Pitágoras, que $A^2 = A_x^2 + A_y^2$.



La descomposición de vectores en sus componentes cartesianos nos permite sumar y operar con vectores por cálculos matemáticos, evitando tener que recurrir a los métodos gráficos, que no son tan precisos. La ventaja está en que para vectores paralelos se suman o restan algebraicamente sus magnitudes, por lo que se opera separadamente con los componentes según cada eje, y luego se componen las resultantes para obtener el vector final.

Si conocemos los componentes A_x y A_y de un vector, entonces podemos obtener la magnitud y dirección del vector aplicando la trigonometría. La magnitud *A* del vector se calcula a partir del teorema de Pitágoras como

$$A = \sqrt{A_x^2 + A_y^2}. \tag{3.2}$$

El ángulo entre el vector **A** y el eje de las *x* está determinado por

Suma de vectores

1. Empezamos por escoger un sistema de coordenadas y hacemos un esquema de los vectores. Usamos técnicas gráficas para tener una estimación cualitativa de la resultante.
2. Descomponemos los vectores en los componentes *x* y *y* y conservamos con cuidado sus signos algebraicos.
3. Sumamos algebraicamente los componentes *x* para encontrar el valor de la resultante *x* y sumamos algebraicamente los componentes *y* para encontrar el valor de la resultante *y*.
4. Luego encontramos la magnitud del vector resultante utilizando la ecuación (3.2) y encontramos el ángulo *θ* a partir del eje de las *x* usando la ecuación (3.3).

3º Composición de velocidades

La primera magnitud vectorial es el desplazamiento o movimiento local. Una segunda es el ritmo de desplazamiento o velocidad. La velocidad puede considerarse, por lo general, una magnitud vectorial porque tiene una cantidad absoluta, la rapidez, y tiene además dirección. En la medida en que podamos definir la velocidad instantánea de un móvil en cierto punto o *hic et nunc* de su movimiento (no debe haber discontinuidad), esa velocidad tiene cierta rapidez de desplazamiento, con cierta orientación y sentido, esto es, con cierta dirección.

Se ve también que la velocidad es magnitud vectorial porque es el resultado de la división de una magnitud vectorial (el desplazamiento), por una magnitud escalar (el tiempo): $\vec{v} = \frac{\partial \vec{x}}{\partial t}$ (donde δ, que es la letra griega minúscula de Δ, significa una variación tan pequeña como se pueda). Y vimos que de la división de un vector resulta otro vector.

Si sumamos velocidades en ciertas condiciones generales, podemos comprobar que la velocidad se comporta al modo de los vectores. Si un móvil se mueve con velocidad v_r en relación a otro móvil que se mueve, a su vez, con velocidad absoluta v_a – por ejemplo un linyera que camina sobre un tren de carga en movimiento – la velocidad total es: $v_t = v_a + v_r$. Si el sentido de v_r es contrario a v_a, la velocidad total es la diferencia: $v_t = v_a - v_r$.

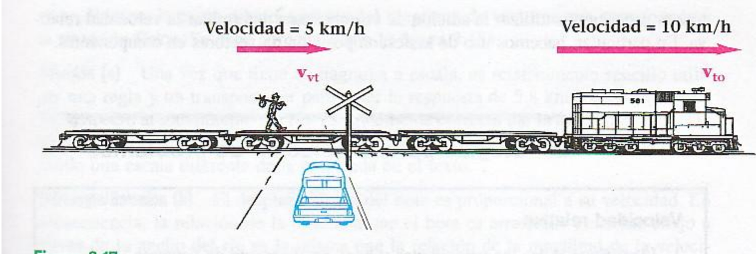
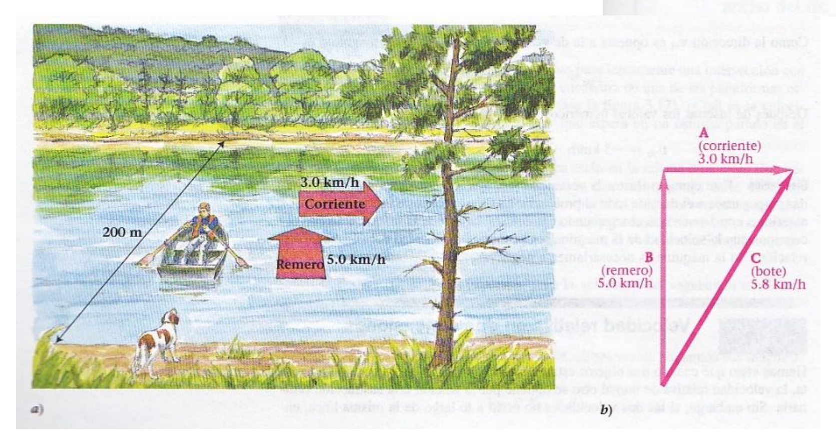


Figura 3.17
Ejemplo 3.5: Un vagabundo que camina con velocidad v_{vt} sobre un tren que se mueve con velocidad v_{to} pasa a un observador estacionario con una velocidad igual a la suma de las dos velocidades.



Si la velocidad relativa del móvil movido forma un cierto ángulo con la velocidad absoluta del móvil que mueve, la velocidad total se halla componiendo las velocidades al modo de los vectores.

Como se ve, desde el punto de vista del cálculo es indiferente considerar cuál es movimiento relativo y cuál absoluto, pero desde el punto de vista físico no, pues no es lo mismo un linyera andando sobre un tren que un tren andando sobre un linyera, ni es lo mismo un bote que cruza un río que un río que cruza un bote.

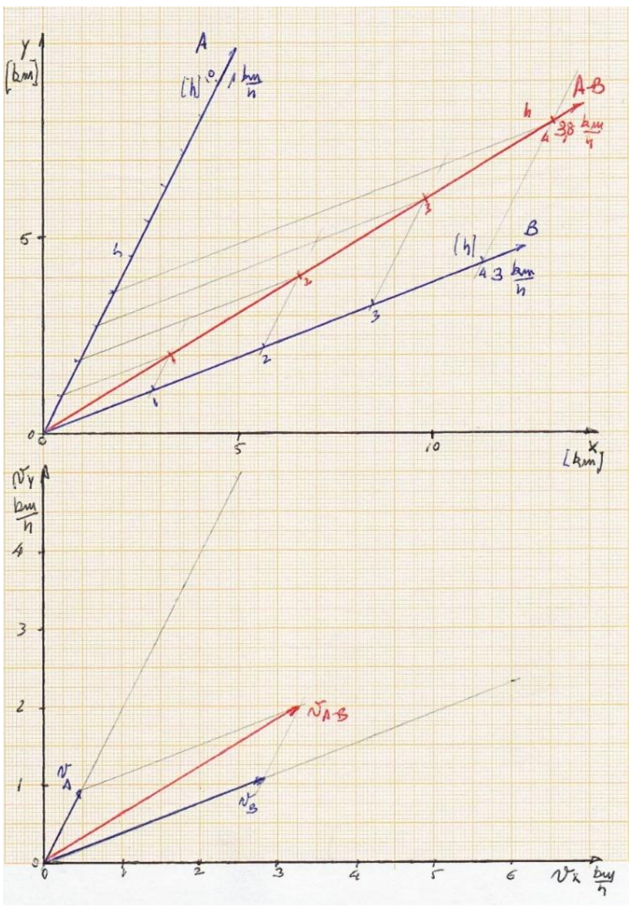
Si volamos en un avión a 1.000 km/h, ¿cuál es nuestra velocidad absoluta en el espacio? Hay que componer primero la velocidad del avión con la velocidad de rotación de la tierra, que en el ecuador es de más de 1.500 km/h en dirección oeste-este. Si viajamos en la misma dirección las velocidades se suman (el día pasa muy rápido), si en dirección contraria se restan (el sol casi no se mueve), si en cierto ángulo, hay que seguir la regla del triángulo o del paralelogramo. Luego hay que componer la velocidad resultante con la velocidad de traslación de la tierra respecto del sol, que es de unos 30 km/sg, es decir, más de 100.000 km/h: de noche se suman y de día se restan. Luego hay que componerla con la velocidad de rotación del sistema solar respecto del centro de la galaxia, que es de unos 270 km/sg, esto es, casi un millón de km/h. Finalmente habría que componerla con la velocidad de la galaxia en el espacio vacío, que no se conoce. Parece que aun estando en cama tendríamos que tener puesto el cinturón de seguridad, por si todo esto frena de golpe.

Para resolver problemas con composición de velocidades, puede convenir descomponer cada velocidad según unos ejes cartesianos, y proceder como se dijo para los vectores.

4º Composición de *Movimientos Rectilíneos Uniformes* en un plano

Dijimos que los desplazamientos pueden considerarse magnitudes vectoriales. Vimos que la velocidad también puede tomarse como un vector. De allí que, cuando un móvil se mueve respecto de otro que también se mueve, sus velocidades pueden componerse según el método vectorial. Según esto, no es difícil resolver cómo se componen diversos *Movimientos Rectilíneos Uniformes* con direcciones diversas en un plano.

Conviene graficarlos en un par de coordenadas espaciales x-y. Los desplazamientos de cada movimiento aparecen como rectas, sobre las que hay que señalar las escalas de tiempo para cada uno, con unidades más o menos largas según sean más o menos rápidos. La velocidad, entonces, está dada por la longitud de cada marca de tiempo. El desplazamiento resultante se calcula con la regla del paralelogramo para cada intervalo de tiempo, y la velocidad por la longitud de las marcas resultantes. El movimiento resultante es evidentemente también rectilíneo uniforme.



Las velocidades pueden representarse en un par de coordenadas que v_x-v_y, y se suman también a modo de vectores.

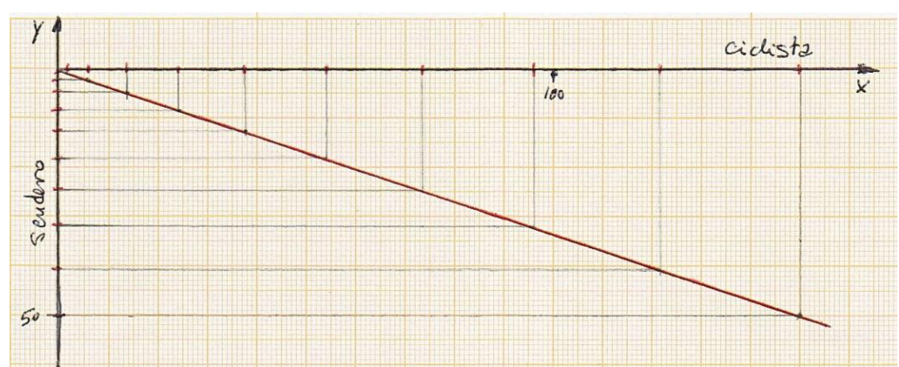
Los cálculos pueden hacerse algebraicamente descomponiendo los vectores de desplazamiento o de velocidad en sus componentes x-y, según las reglas dadas para los vectores en general.

Repitamos que el físico debe guardar en el espíritu, en cada caso, qué significa en la realidad cada uno de los gráficos y parámetros. Un móvil no puede estar en dos lugares a la vez, por lo tanto ¿qué sentido tiene componer movimientos? Ya lo dijimos: se componen cuando un movimiento es relativo y el otro absoluto. En el gráfico, **A** puede ser el movimiento del río, donde **y** es la dirección norte y **x** la dirección este. **B** es el movimiento del bote en relación al agua, es decir, medido como si el agua estuviera inmóvil (siempre mirando la brújula en cuanto a las direcciones). Y **A-B** es el movimiento del bote respecto del que mira desde la orilla.

5º Composición de aceleraciones

En un sendero de montaña que se desploma con una aceleración de 1m/sg2, un ciclista se apura con una aceleración de 3 m/sg2. ¿Cuál es el movimiento resultante? Suponiendo que la velocidad de caída del sendero y del ciclista es nula al comienzo del desastre, el espacio recorrido por cada uno en cada segundo está dado por la fórmula: $e = \frac{a\,t^2}{2}$ Si graficamos el movimiento de caída en la dirección **y**, y el del ciclista en relación al sendero en la dirección **x**, tenemos:

Tiempo	Sendero	Ciclista
1	- 0.5	1.5
2	- 2	6
3	- 4.5	13.5
4	- 8	24
5	- 12.5	37.5
6	- 18	54
7	- 24.5	73.5
8	- 32	96
9	- 40.5	121.5
10	- 50	150



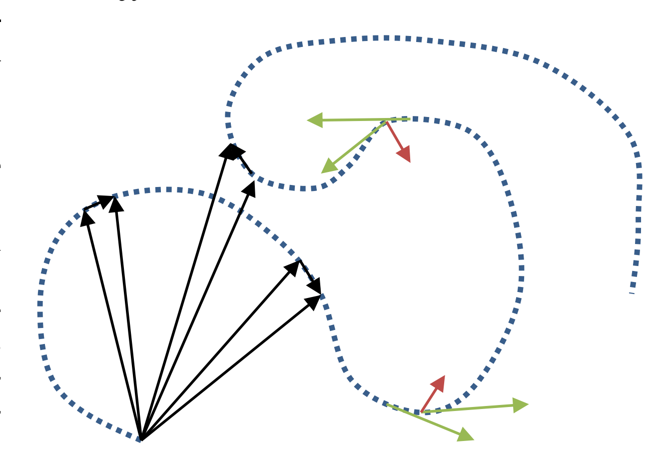
El movimiento resultante es también un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado. Podíamos calcularlo sin graficar. Si llamamos **r** al desplazamiento compuesto, como los desplazamientos forman un ángulo recto, según lo visto para vectores tenemos:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{\left(\frac{a_x\,t^2}{2}\right)^2 + \left(\frac{a_y\,t^2}{2}\right)^2} = \frac{1}{2}\sqrt{a_x^2 + a_y^2}\;t^2$$

Como se ve, el movimiento resultante es también un movimiento uniformemente acelerado, con una aceleración total igual a la suma de las aceleraciones componentes según el teorema de Pitágoras. Por aquí vamos viendo que la aceleración es también, como la velocidad, una magnitud vectorial, que no sólo tiene cierta cantidad, sino también dirección. Era de esperar, porque es también, como la velocidad, el resultado de la división de una magnitud vectorial (la velocidad), por una magnitud escalar (el tiempo): $\vec{a} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t}$ Y por el ejemplo comprobamos que las aceleraciones se suman al modo de los vectores.

6º Cinemática general en el plano

Supongamos un móvil con movimiento libre en un plano con dirección y velocidad variables, por ejemplo una lancha a motor en un lago. Medimos los lugares con el vector de desplazamiento $\vec{r}$, del muelle de origen al lugar que ocupa en cada instante. La velocidad que tiene en cada instante (dando por supuesto que el movimiento guarda continuidad) viene dada, en notación vectorial, por la ecuación: $\vec{v} = \frac{\partial \vec{r}}{\partial t}$ Como $\partial \vec{r}$ es el resultado de una diferencia de vectores, tiene una dirección tangencial a la curva de desplazamiento del móvil, de manera que la velocidad en cada instante, tiene la dirección de $\partial \vec{r}$, esto es, tangencial.



La aceleración, a su vez, se define como la variación de la velocidad en razón del tiempo: $\vec{a} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t}$ Lo que también hay que tener en cuenta, como para la velocidad, es que la velocidad es magnitud vectorial y su variación también. Por lo tanto, no sólo hay que tener en cuenta las variaciones de la rapidez (la magnitud absoluta de la velocidad), sino también y a la vez deben tenerse en cuenta las variaciones de dirección. Como las direcciones de la velocidad son tangenciales a la línea de desplazamiento, las direcciones de la aceleración se inclinan al lado cóncavo de las curvaturas, orientadas hacia atrás si el movimiento se frena, orientadas hacia adelante si se acelera. Se da el caso, entonces, de un movimiento de rapidez constante (el cuentakilómetros de la lancha está fijo), pero con variaciones de dirección. En este caso también hay aceleración, y su dirección es perfectamente perpendicular a la velocidad en cada punto, en dirección a la concavidad de la curva, y mayor o menor según la curva sea más o menos cerrada (grafíquese cada caso y se verá).

Para el cálculo numérico de estas magnitudes, convendrá recurrir a un sistema de coordenadas cartesianas o polares, según el caso. En el caso de coordenadas cartesianas, se descompone el movimiento en dos movimientos rectilíneos según los ejes x-y, calculando el desplazamiento, velocidad y aceleración resultantes con el teorema de Pitágoras. En todos estos casos hay que ser cuidadoso con el signo de cada componente, que determina la dirección.

7º Movimiento de proyectiles

Un caso interesante y práctico de descomposición de un movimiento en sus componentes x-y, es el del movimiento de un proyectil, como el de una piedra que se arroja. Es fácil comprobar (aunque aquí en La Reja no hay piedras) que la piedra describe una trayectoria a manera de parábola. Hagamos una pequeña catapulta para graduar la velocidad de salida y el ángulo. A igual rapidez de salida, ¿qué ángulo hace que la piedra llegue más lejos? Porque si la largamos a 0º, toca tierra inmediatamente, y si la largamos a 90º nos cae en la cabeza: en ambos casos no salimos del mismo lugar. Pero si variamos los ángulos, veremos que hay uno de distancia máxima. ¿Será el intermedio de 45º? ¡Hay que experimentar!

Pero también podemos calcularlo. Una vez que la piedra sale de nuestra máquina a cierta velocidad v0, sufre dos aceleraciones: una es la de resistencia del aire, que tiende a frenarla, y otra la de la gravedad, que es tiende al suelo. Si hacemos el experimento con velocidades no muy grandes, podemos despreciar el efecto de frenado del aire, que aumenta con la velocidad. Sólo queda la aceleración de la gravedad, que es constante. Conviene, entonces, descomponer el movimiento de la piedra según un eje **y** vertical y un eje **x** horizontal. La velocidad inicial tendrá, pues, dos componentes $\mathbf{v_x}$ y $\mathbf{v_y}$, según el ángulo $\boldsymbol{\theta}$ con que se lance:

$$v_x = v_0 \cos\theta \qquad\qquad v_y = v_0 \sin\theta$$

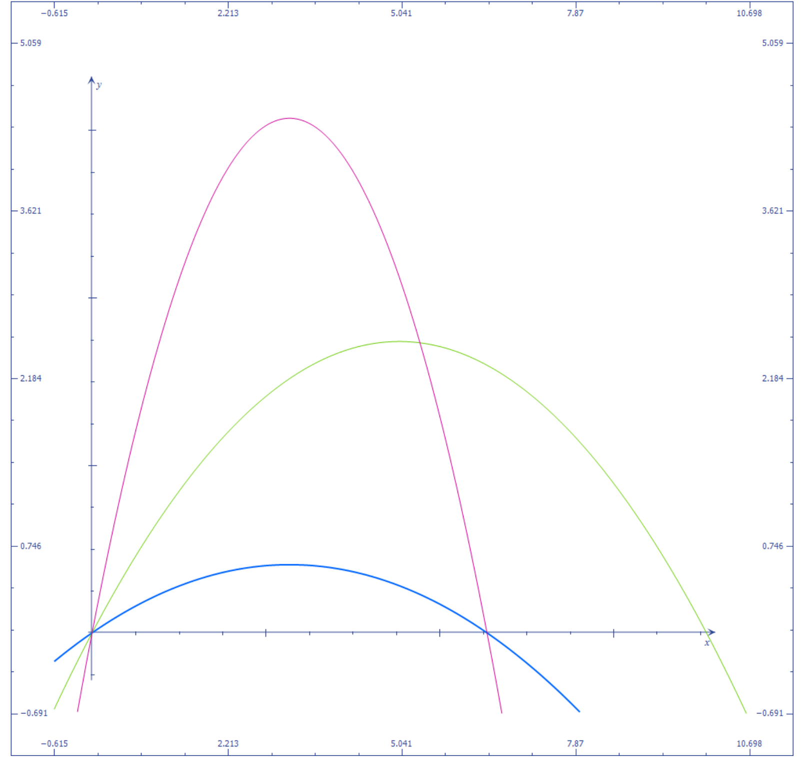
Lo interesante del caso es que, como la aceleración de la gravedad **g** tiene dirección vertical, sólo va a afectar a la componente $\mathbf{v_y}$ de la velocidad inicial. De este modo tendremos un movimiento uniformemente acelerado según el eje **y**, y un movimiento rectilíneo uniforme según el eje **x**. Si la componente vertical de la velocidad es nula, el móvil no sale del piso. Si tiene un cierto valor, se hace fácil calcular cuánto tarda en volver al suelo, pues cuando vuelva tendrá la misma velocidad pero en sentido contrario. Por lo tanto, si vemos la ecuación del tiempo en función de la velocidad y aceleración: $t = \frac{v - v_0}{a}$ para el caso presente tendremos:

$$t = \frac{2\, v_y}{g}$$

Durante ese tiempo, el proyectil recorre una cierta distancia con la velocidad $\mathbf{v_x}$, cuyo cálculo es simple: $e = v_x t$ Si reemplazamos el tiempo calculado, y tenemos en cuenta las relaciones de $\mathbf{v_x}$ y $\mathbf{v_y}$ con $\mathbf{v_0}$, nos queda:

$$e = \frac{2v_0^2}{g} \sin\theta \cos\theta$$

En trigonometría se demuestra que: $2\sin\theta\cos\theta = \sin 2\theta$ Por lo que queda: $e = \frac{v_0^2}{g}\sin 2\theta$



Como el valor del seno es máximo para el ángulo recto, en que da 1, se ve que, como supusimos, la distancia es máxima para un ángulo de 45º.

Podemos calcular también la trayectoria del proyectil en función de la velocidad inicial y del ángulo. La altura **y** viene dada por: $y = v_{yt} - \frac{gt^2}{2}$ (la aceleración es negativa por va en sentido contrario al eje y). Como en el eje x el movimiento es con velocidad uniforme, tenemos: $t = \frac{x}{v_x}$ Si reemplazamos el tiempo en la primera ecuación tenemos:

$$y = \frac{v_y x}{v_x} - \frac{gx^2}{2v_x^2}$$

De allí tenemos:

$$y = \tan\theta\, x - \frac{g}{2v_0^2\cos\theta^2}x^2$$

La ecuación es de una parábola. En el gráfico representamos los valores **x-y** para una velocidad inicial de 10 m/sg y los ángulos 20º, 45º y 70º. Para 45º, inclinación de distancia máxima, la ecuación se simplifica, porque tan 45º = 1, y cos 45º^2 = ½. Por lo que queda: $y = x - \frac{g}{v_0^2}x^2$

III. MOVIMIENTOS DE TRASLACIÓN EN EL ESPACIO

Las ecuaciones cinemáticas para el espacio se hallan generalizando lo que se dijo para el plano. Supongamos que $\vec{r}$ es el vector de desplazamiento de un móvil que se mueve libremente en el espacio, por ejemplo una abeja que sale del colmenar. La velocidad y la aceleración en cada instante vienen dadas por las ecuaciones vectoriales: $\vec{v} = \frac{\partial \vec{r}}{\partial t}$ $\vec{a} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t}$ Sólo hay que tener en cuenta que las direcciones de los vectores tienen las tres dimensiones del espacio. La velocidad siempre es tangente a la línea de desplazamiento, y la aceleración se orienta hacia la convexidad de las curvaturas. El cálculo gráfico se hace muy difícil, salvo para casos particulares, como movimientos en un cilindro, o en una esfera. Para el cálculo numérico conviene descomponer el movimiento según tres ejes cartesianos **x-y-z**, o según ejes polares, o según combinación de ambos, dependiendo del caso. Hoy, gracias a las computadoras, se han hecho posibles cálculos precisos para movimientos complejos, como cuando se envía una sonda al encuentro de un asteroide.

B. Movimientos de rotación

En los cuerpos rígidos podemos distinguir dos especies de movimientos: el de *traslación* y el de *rotación*. El movimiento de traslación, dijimos, afecta a las partes en razón del todo, porque cada parte se mueve de la misma manera que todo el cuerpo; mientras que el de *rotación* afecta al todo en razón de las partes, porque el movimiento total es el resultante del movimiento diverso de cada parte.

¿Es movimiento en la *ubicación* (*ubi*) del cuerpo, o es movimiento en su *situación* (*situs*)? Porque una esfera que rota no cambia de lugar, por lo que no parece que pueda considerarse propiamente movimiento *local*. Debe decirse, empero, que es ciertamente movimiento *local*. Porque en un cuerpo rígido que rota no hay cambio en el orden de las partes entre sí y respecto al todo, a lo que se refiere el predicamento *situs*, sino que cambian las partes en orden a los cuerpos circundantes, lo que es propio del cambio local. Si la esfera tiene cualidades heterogéneas en sus diversas partes, por ejemplo si se trata de un imán que gira, se verá afectada su relación con las cosas en que está en contacto según el lugar.

Para empezar, como conviene, con lo más simple, consideraremos primero el movimiento circular uniforme, luego el movimiento circular uniformemente acelerado, y finalmente generalizaremos para todo movimiento circular.

I. MOVIMIENTO CIRCULAR UNIFORME – MCU

1º Velocidad angular

El movimiento rotatorio o circular es el de un cuerpo rígido que gira en torno a un eje, es decir, en torno a una línea recta que permanece fija. Por poco que se imagine cualquiera de estos movimientos, es evidente que siempre tiene que tener un eje de giro.

Así como para el movimiento de traslación hemos definido la velocidad como el ritmo de variación del desplazamiento en razón del tiempo, en el movimiento de rotación conviene definir una velocidad angular ω, que es el ritmo del desplazamiento angular en razón del tiempo: $\omega = \frac{\partial \theta}{\partial t}$

Llamamos movimiento circular uniforme al movimiento rotatorio que tiene velocidad angular constante en el tiempo. Su velocidad angular puede medirse en diversas unidades, ya sea en ciclos o revoluciones por unidad de tiempo, ya en grados sexagesimales por unidad de tiempo:

- El día es justamente el tiempo que tarda la tierra en completar un ciclo, por lo que su velocidad angular es: $\omega_T = 1\,\frac{ciclo}{día}$ Para movimientos más rápidos se usan frecuentemente en física dos unidades: las *revoluciones por minuto* (rpm), y los *hertz* o *hercios* (en honor del físico alemán Heinrich Rudolf Hertz, el primero en demostrar la naturaleza de la propagación de las ondas electromagnéticas), o ciclos por segundo: $1\;hz = 1\,\frac{ciclo}{sg}$ Los tocadiscos antiguos giraban a 33⅓, 45 y 78 rpm.
- Los *grados sexagesimales* vienen de dividir por 60 la sexta parte de un círculo completo. La sexta parte del círculo es el ángulo que corresponde a un triángulo equilátero, pues en el círculo caben 6 de tales triángulos, formando un hexágono. Si a cada uno de esos ángulos se los divide en 60 (número que tiene la ventaja de ser muy divisible: por 2, 3, 4, 5 y 6), tenemos un ángulo de 1 *grado* sexagesimal. Si al grado lo dividimos de nuevo por 60, tenemos un ángulo de un *minuto*[1], y si lo volvemos a dividir en 60 tenemos un ángulo de un *segundo*. Los grados, minutos y segundos sexagesimales se notan así: º ’ ”. Podemos tener, por ejemplo, un ángulo de 23º 40’ 50”. Una velocidad angular de un hercio, entonces, equivale a 360º/sg. La velocidad angular de la tierra, medida en grados sexagesimales por segundo es de 0,00417º/sg. Es muy lenta, por lo que conviene darla en segundos (sexagesimales) por segundo (temporales): 15”/sg

Es evidente que las diferentes partes del cuerpo rígido que gira tienen velocidades de traslación diferentes, dependiendo de la distancia al eje de giro. No es difícil calcular la relación entre la velocidad angular y la velocidad lineal o de traslación según dicha distancia, que llamaremos *radio* (r). En un ciclo, cada parte del cuerpo rígido recorre una circunferencia de radio r, por lo que la distancia recorrida es de 2πr. Si la velocidad angular viniera

[1] Llamado así porque se divide como las horas, aunque la hora es 1/24 del ciclo de la tierra, y el grado es 1/(6x60) del ciclo completo. Un minuto de tiempo equivale a un giro de 15 minutos sexagesimales de la tierra.

dada en ciclos por unidad de tiempo, la velocidad lineal viene dada por la siguiente proporción: $v = 2\pi r\omega$ La unidad de la velocidad depende de la unidad de r y la unidad de ω. Si aquél es dado en metros y ésta en hercios, la velocidad resulta en m/sg. Si la velocidad angular viene dada en grados por segundo, hay que tener en cuenta que un grado equivale a la distancia de $\frac{2\pi r}{360}$ De allí que la relación entre velocidades es: $v = \frac{2\pi r}{360}\omega$ Una sierra circular o una amoladora eléctrica puede tener 2.000 rpm. Si se tiene en cuenta que los discos de corte tienen un diámetro de unos 25 cm, podemos calcular la velocidad de las partes que están en sus bordes: $v = 2\pi\, 0.125m\, 2000\, rpm = 1571\frac{m}{min} = 26.18\frac{m}{sg} = 94.25\frac{km}{h}$ Salen a casi 100 km/h, por lo que si se rompen son peligrosos. Los minitornos tienen discos de uno 3 cm, pero pueden girar a 30.000 rpm, por lo que sus partes salen disparadas 1.8 veces más rápido, es decir, a 170 km/h.

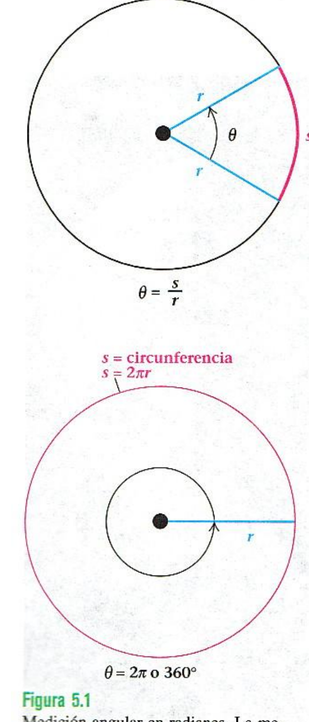


Figura 5.1
Medición angular en radianes. La medición en radianes de un ángulo es la relación de la longitud del arco subtendido al radio. Si la longitud del arco es toda la circunferencia, el ángulo en radianes es 2π.

2º Radianes

Una unidad muy conveniente para medir los ángulos es el *radián*. Para cada ángulo, la proporción entre el arco y el radio es constante. De allí que podemos medir los ángulos por la relación del arco al radio. Para un ángulo de 360º, el arco correspondiente es la circunferencia completa, por lo que la relación del arco al radio es: $360º \rightarrow \frac{2\pi r}{r} = 2\pi$ El radián se define como la unidad en este sistema de medida angular, esto es, el ángulo para el cual el arco sobre el radio da uno. Si 360º mide 2π radianes, tenemos: $1\, rad = \frac{360}{2\pi} = 57.3º$

Eratóstenes (*ca.* 276-196 a.C.) percibió que cuando el Sol estaba directamente sobre Siene (la moderna Assuán) en el sur de Egipto, estaba aproximadamente 7° de cuando estaba directamente sobre Alejandría (véase la figura 5.2). Utilizando la distancia conocida entre los dos puntos de observación, fue capaz de determinar la circunferencia de la Tierra. Use una cifra de 770 km para la distancia con el fin de llevar a cabo el mismo cálculo.

Estrategia En la figura vemos que la distancia de Siene a Alejandría es la longitud del arco que subtiende un ángulo de 7°. Si expresamos el ángulo en radianes, podemos hacer uso de la definición de la ecuación (5.1) para determinar el radio de la Tierra y, por tanto, la circunferencia.

Solución El ángulo medido en radianes es

$$\theta = (7°)\left(\frac{2\pi \text{ rad}}{360°}\right) = 0.122 \text{ rad}.$$

El radio de la Tierra, dado por $r = s/\theta$, donde s es la longitud del arco de 770 m, es

$$r = \frac{s}{\theta} = \frac{770 \text{ km}}{0.122 \text{ rad}} = 6300 \text{ km}.$$

La circunferencia de la Tierra se halla a partir de

$$C = 2\pi r = 2\pi(6300 \text{ km}) = 40\,000 \text{ km}$$

Disertación El valor moderno para el radio medio de la Tierra es 6380 km, escasamente 1% mayor que la medición de Eratóstenes.

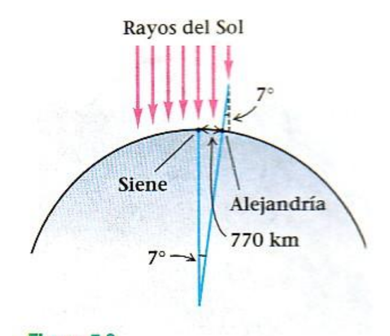


Figura 5.2
Cuando el Sol está directamente sobre el cenit en Siene, se encuentra cerca de 7° alejado de cuando está sobre el cenit en Alejandría.

Si medimos los ángulos en radianes, podemos calcular muy simplemente la distancia **s** que recorre un punto a distancia **r** del centro de giro de un cuerpo, si éste ha girado un ángulo θ: $s = \theta r$ De allí que, si medimos la velocidad angular de un movimiento circular en radianes por segundo, se hace también muy simple calcular la velocidad lineal correspondiente a un radio determinado: $v = \omega r$ De allí la conveniencia de utilizar los radianes como unidad de medida de los ángulos.

3º La aceleración en el MCU

Como es notorio, la velocidad de cada parte del cuerpo rígido en el MCU es mayor o menor según su distancia al eje de giro, y es constante en su rapidez, aunque la dirección varía de manera también constante. Como vimos, la curvatura de la velocidad supone una cierta aceleración hacia la concavidad de la curvatura. Como las curvas que describen cada parte del cuerpo son círculos, la aceleración tendrá dirección hacia el eje de giro. Esta aceleración se calcula según lo visto: $\vec{a} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t}$ En un pequeñísimo intervalo de tiempo ∂t, el cuerpo se mueve un pequeñísimo ángulo $\partial \theta$, y las velocidades sucesivas, que son siempre tangenciales (perpendiculares al radio), varían el mismo ángulo $\partial \theta$ en su dirección. Se ve que para intervalos de tiempo cada vez más pequeños, la dirección de $\partial \vec{v}$ tiende a ser radial hacia el centro, de donde se sigue que la dirección de la aceleración es *centrípeta*, esto es, que lleva hacia el centro.

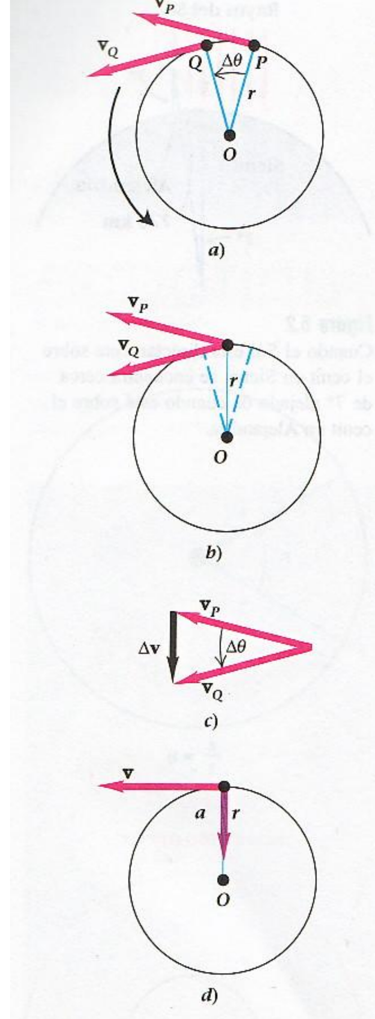


Figura 5.3
a) El vector de velocidad instantánea en los puntos *P* y *Q* para una partícula que se mueve en una trayectoria circular. El vector de la velocidad en un momento posterior se muestra en el punto *Q*.
b) Los vectores $\mathbf{v}_P$ y $\mathbf{v}_Q$ se trasladan a un origen común para su comparación.
c) El vector $\Delta\mathbf{v} = \mathbf{v}_Q - \mathbf{v}_P$. A medida que $\Delta\theta$ se hace muy pequeño, $\Delta\mathbf{v}$ se hace perpendicular tanto a $\mathbf{v}_Q$ como a $\mathbf{v}_P$. *d*) La partícula en movimiento tiene una velocidad instantánea tangencial al círculo y una aceleración dirigida hacia el centro del círculo.

Como el ángulo que forman los radios sucesivos es igual al ángulo que forman las velocidades tangenciales, para ángulos cada vez más pequeños tiende a ser equivalente la siguiente proporción: $\frac{\partial s}{r} \approx \frac{\partial v}{v}$ donde ∂s es la longitud del arco recorrido en el tiempo ∂t. Ahora bien, si tenemos en cuenta que $\partial s = v \partial t$ se sigue que, para ángulos muy pequeños:

$$\frac{\partial s}{r} = \frac{\partial v}{v} \rightarrow \frac{v \partial t}{r} = \frac{\partial v}{v} \rightarrow \frac{v^2}{r} = \frac{\partial v}{\partial t} \rightarrow \boldsymbol{a_c} = \frac{\boldsymbol{v^2}}{\boldsymbol{r}}$$

Donde a_c es la *aceleración centrípeta*. En el MCU, entonces, hay en cada parte del cuerpo móvil una aceleración que tiene dirección al eje de rotación y cuya magnitud es igual al cuadrado de la velocidad tangencial sobre su distancia al eje.

4º La rotación de la tierra

La tierra rota con una velocidad angular de 1/24 ciclos/hora. Si tenemos en cuenta que el radio medio de la tierra es de 6380 km, podemos calcular la velocidad tangencial de un hombre en el ecuador (que es el lugar de distancia máxima al eje de giro de la tierra): $v_t = \frac{2\pi r_t}{24\,h} = 1670\frac{km}{h}$ En los polos la velocidad es nula, y tiende al máximo calculado en la medida en que nos acercamos al ecuador. Un avión que viajara a 1670 km/h en dirección este-oeste por la línea del ecuador, tendría siempre el sol en la misma posición, pues anularía el movimiento de rotación de la tierra. Como los aviones comerciales viajan a unos 1000 km/h, en los viajes de regreso de Europa las horas solares pasan más lento. En la línea del ecuador, se alargan según la proporción $\frac{h\,solar}{60\,min} \sim \frac{v_t}{(v_t - v_a)}$ donde $\mathbf{v_t}$ es la velocidad tangencial de la tierra y $\mathbf{v_a}$ es la del avión. Para un avión comercial las horas son 2.5 veces más largas, tardando el sol 150 minutos en moverse el ángulo de una hora.

Si se viaja en la dirección opuesta, oeste-este, la velocidad del avión se suma a la de la tierra y las horas pasan más rápido: $\frac{h\,solar}{60\,min} = \frac{v_t}{(v_t + v_a)}$ Para un avión comercial son 0.63 de una hora normal, tardando 37.5 minutos.

¿Cuál es la aceleración centrípeta de los hombres y cosas en el ecuador, si tenemos en cuenta la velocidad tangencial a la que se mueven? Aplicamos la fórmula hallada:

$$a_c = \frac{v^2}{r} = \frac{(1670\frac{km}{h})^2}{6380\,km} = 437\frac{km}{h^2} = 0.034\frac{m}{sg^2}$$

¿Esto qué significa? Que si viajáramos por el espacio libre en una nave a dicha velocidad, y se nos aplicara una aceleración siempre perpendicular a nuestra velocidad tal como la que calculamos (por efecto de un chorro de gases laterales, por ejemplo), la nave describiría una circunferencia exactamente igual al radio de la tierra. Ahora

imaginemos un asteroide que roza tangencialmente a alta velocidad la superficie de la tierra. Por razón de la gravedad, sufre una aceleración perpendicular: $g = 9.8\frac{m}{sg^2}$ Es interesante calcular a qué velocidad debe llegar para que esa aceleración lo haga describir exactamente una circunferencia alrededor de la tierra. Para mayor realismo, supongamos que entra a unos 120 km de altura, donde al atmósfera es muy poco densa y no lo destruye por fricción. Cabe suponer que allí la aceleración de la gravedad es un poco menor, en proporción inversa al cuadrado de la distancia al centro de la tierra: $g' = g\frac{r_t^2}{r^2} = 9.8\frac{6380^2}{6500^2} = 9.44\frac{m}{sg^2}$ Tenemos, entonces:

$$v = \sqrt{g'r} = \sqrt{9.44 \times 6500000}\frac{m}{sg} = 7.833\frac{m}{sg} = 28.200\frac{km}{h}$$

Si tenemos en cuenta que una circunferencia de 6.500 km de radio tiene un largo de 40.840 km, se sigue que el asteroide describe un círculo completo cada 87 minutos. Este es exactamente el caso de un cuerpo en órbita alrededor de la tierra. Los satélites artificiales deben ser puestos a estas velocidades para que queden en órbita alrededor de la tierra, dando un giro completo cada hora y media.

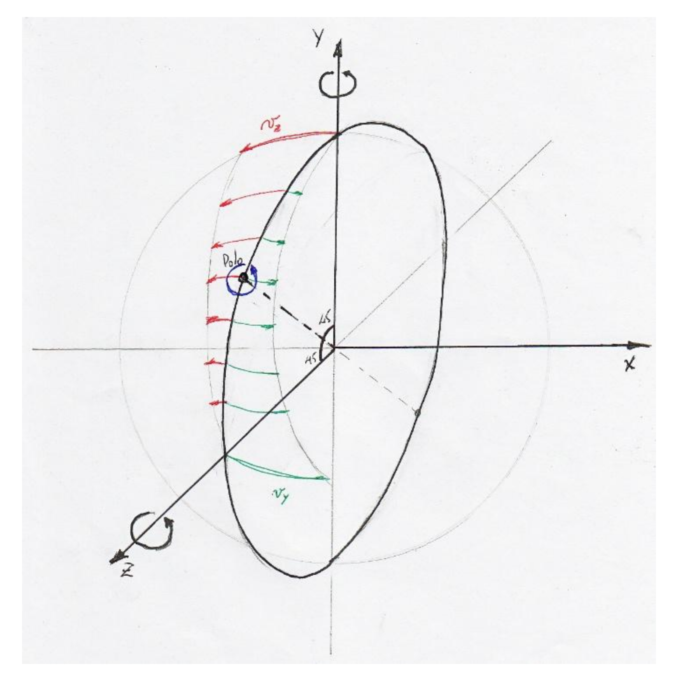
Si ahora tenemos en cuenta que la luna está a una distancia media de 384.000 km del centro de la tierra, y que su período de rotación es de 27.3 días, podemos calcular la aceleración que sufre hacia el centro de la tierra. La velocidad tangencial es $v = \frac{2\pi R}{T}$ donde R es la distancia al centro de la tierra y T el período. Si ahora tenemos en cuenta que la aceleración de la gravedad para la luna viene dada por: $g_l = \frac{v^2}{R}$ reemplazando se sigue:

$$g_l = \frac{4\pi^2 R}{T^2} = \frac{4\pi^2 3.84 \times 10^8 m}{(27.3 \times 24 \times 3600\, sg)^2} = 2.72 \times 10^{-3}\frac{m}{sg^2}$$

La aceleración de la gravedad de la luna respecto de la tierra es 3600 veces menor que la de los cuerpos sobre la superficie de la tierra. Es así porque el radio de la luna es 60 veces mayor que el radio de la superficie de la tierra, y se puede ver que la gravedad disminuye con el cuadrado de la distancia: $60^2 = 3600$.

5º La velocidad angular como magnitud vectorial

"¿Qué pasa con la velocidad angular? ¿Es un vector? Ya hemos discutido la rotación de un objeto sólido alrededor de un eje fijo, pero por el momento supongan que lo estamos girando simultáneamente con respecto a *dos* ejes. Podría estar girando dentro de una caja mientras la caja está girando con respecto a algún otro eje. ¡El resultado neto de estos movimientos combinados es que el objeto simplemente gira con respecto a algún eje nuevo! Lo maravilloso de este nuevo eje es que se puede imaginar de la siguiente manera. Si escribimos la velocidad de rotación en el plano **xy** como un vector en la dirección **z** cuyo largo es igual a la velocidad de rotación en el plano, y si otro vector se dibuja en la dirección **y**, digamos, que es la velocidad de rotación en el plano **xz**, entonces, si los sumamos vectorialmente mediante la regla del paralelogramo, el módulo del resultado nos dice con qué velocidad está girando el objeto y la dirección nos dice en qué plano. Es decir, simplemente, la velocidad angular *es* un vector del cual obtenemos las magnitudes de las rotaciones en tres planos como proyecciones en ángulo recto sobre estos planos. – Que esto es cierto puede deducirse componiendo los desplazamientos de las partículas del cuerpo durante un tiempo infinitesimal ∂t. Esto no es evidente y se deja para aquellos que estén interesados en resolverlo –"[1].



Supongamos que se trata de una esfera que gira a la misma velocidad según ambos ejes **z** e **y**. Si observamos con el eje **z** perpendicular a nosotros, un punto sobre el eje **y** tiende a moverse a la izquierda con el giro de eje **z**, y un punto sobre el eje **z** tiende a moverse a la derecha con el giro de eje **y**. Un punto sobre el arco encerrado entre los ejes **y** y **z**, cercano al eje **y**, se mueve más lento a la izquierda, pues el giro según **z** se ve contrarrestado por el

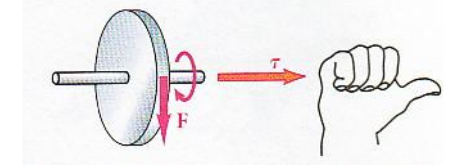
[1] Richard Feynman, *Física I-A, Mecánica, radiación y calor*, edición bilingüe 1971, sección 20-2.

giro según **y** (que crece al alejarnos del eje **y**, y es de sentido contrario). En la mitad del arco, a 45º entre los ejes **y** y **z**, los movimientos se anulan y el punto queda quieto. Éste es un polo del movimiento resultante.

En lo concreto, sería muy difícil darle a una esfera dos movimientos circulares como los descritos, pues habría que comunicarle el giro permitiendo que la esfera se desplace (por causa del otro giro) bajo el mismo eje del giro que se le da. Quizás podría andar si se la hace girar con ejes que no atraviesan la esfera, sino que la sujetan suavemente entre dos anillos a modo de círculos polares.

Si tuviéramos, en cambio, un cuerpo que gira según un eje fijo al cuerpo, y se lo intenta hacer rotar según otro eje perpendicular, como sería el caso de un trompo que gira con cierta inclinación respecto del piso, que tiende a rotar hacia la horizontal por razón de la gravedad, el caso es distinto. Si el trompo gira inclinado 45º a la izquierda en el plano **xy**, la gravedad tiende a darle un giro con eje en la dirección **z**, hacia el observador. Si hacemos la composición de los vectores de velocidad angular por la regla del paralelogramo, resulta un eje de giro que se inclina hacia el observador según el plano formado por los dos vectores. Es decir, el trompo no tiende a caer, sino a girar su eje de rotación en el mismo sentido de la rotación del trompo. Y en la medida en que gira el mismo eje de rotación del trompo, gira también el eje de la rotación de caída, que se mantiene siempre perpendicular al plano del eje del trompo respecto del piso. De allí que, como cualquier chico que juega al trompo sabe, un trompo que gira inclinado no cae, sino que danza un bailecito que se hace cada vez más amplio mientras se va frenando (pues la velocidad de giro va siendo menor, pero el giro por gravedad aumenta mientras más se inclina el eje de rotación hacia el plano del piso).

En el manejo de magnitudes vectoriales, como en el de cualquier magnitud, hay que tener cuidado con el sentido de la magnitud, si es positiva o negativa, esto es, si la flecha del vector es para un lado o para el otro. Como los ángulos que se miden, por ejemplo, en el plano **xy**, son positivos en el sentido antihorario, y negativos en el sentido horario, se considera – por convención universal muy razonable de los físicos – que un movimiento circular en sentido antihorario tiene una velocidad angular positiva (pues es positivo el aumento de los ángulos), que se grafica como un vector con flecha saliente hacia el observador, que es el sentido positivo del eje **z**. Un modo práctico de recordarlo es la *regla de la mano derecha*: si se disponen los dedos de la mano derecha en el sentido del giro, el pulgar indica la dirección del vector de velocidad angular.



Sabiendo que podemos tratar las velocidades angulares como magnitudes vectoriales, no resulta difícil generalizar las ecuaciones del movimiento rotatorio. Pero pasaremos rápidamente por estos asuntos, no porque carezcan de interés, sino para no alargar demasiado el curso de nuestros estudios.

II. MOVIMIENTO CIRCULAR UNIFORMEMENTE ACELERADO – MCUA

Así como definimos la aceleración lineal como la variación de la velocidad lineal en razón del tiempo, así podemos también definir la aceleración angular como la variación de la velocidad angular en razón del tiempo:

$$\alpha = \frac{\partial \omega}{\partial t}$$

No se confunda la aceleración angular que ahora definimos con la aceleración centrípeta de la que hablamos más arriba. La aceleración centrípeta es una aceleración lineal, referida a la velocidad lineal de cada punto del cuerpo que gira, y que es distinta según la distancia de un punto al eje de rotación. La aceleración lineal, en cambio, se refiere a la velocidad angular, que es la misma para todo el cuerpo, y que, por lo tanto, también es la misma para todas las partículas del cuerpo que rota.

Así como para los movimientos de traslación o lineales definimos tres magnitudes: *espacio, velocidad y aceleración* (x, v, a), así para los movimientos de rotación también definimos tres magnitudes análogas: *ángulo, velocidad angular y aceleración angular* (θ, ω, α). Y como tienen relaciones análogas, se pueden deducir ecuaciones análogas entre el *movimiento rectilíneo uniformemente acelerado* y el *movimiento circular uniformemente acelerado* (cuyas magnitudes vectoriales se dan también en la misma línea, perpendicular al plano de giro), como indicamos en la siguiente tabla:

Ecuaciones del movimiento uniformemente acelerado	
Rectilíneo	***Circular***
$v = v_0 + at$	$\omega = \omega_0 + \alpha t$
$v = \sqrt{v_0^2 + 2ae}$	$\omega = \sqrt{\omega_0^2 + 2\alpha\theta}$
$e = v_0 t + ½\, at^2$	$\theta = \omega_0 t + ½\, \alpha t^2$

III. Cinemática general del movimiento rotatorio

Para proponer ecuaciones cinemáticas generales para el movimiento rotatorio conviene tener en cuenta la posición, velocidad y aceleración angulares como magnitudes vectoriales, como hicimos para la cinemática lineal. La posición angular de un sólido puede determinarse respecto de tres ejes cartesianos de giro **xyz**. El valor según **x** representa el giro del plano **yz** desde la posición inicial, medido en grados o radianes, y lo mismo equivalentemente para los otros ejes.

Así definida la posición angular $\vec{\theta}$, que puede descomponerse en las tres direcciones $\vec{\theta}_x, \vec{\theta}_y, \vec{\theta}_z$, puede determinarse la velocidad y aceleración angular por las ecuaciones siguientes: $\vec{\omega} = \frac{\partial\vec{\theta}}{\partial t}$ $\vec{\alpha} = \frac{\partial\vec{\omega}}{\partial t}$ Estas ecuaciones también pueden descomponerse según los tres ejes, lo que puede facilitar ciertos cálculos.

El análisis vectorial permite ciertas intuiciones que no serían evidentes de otro modo. Si observamos que el eje de giro de un trompo gira a su vez en su inclinación al plano del piso, ahora podemos decir que sufre una aceleración angular perpendicular al plano formado por el eje del trompo (que es la dirección de su velocidad angular) y la vertical. Esta aceleración, como vimos, responde a la tendencia a girar por fuerza de gravedad.

Como puede verse, el análisis de diversos tipos de movimientos y de la combinación de movimientos puede extenderse al infinito. Nosotros ya nos hemos extendido suficientemente para dar una idea de cómo se procede en estas consideraciones. Pasemos ahora al asunto más importante desde el punto de vista científico, que consiste en determinar las causas de los movimientos.

Capítulo Cuarto
Análisis causal del movimiento inercial

Después de haber considerado el movimiento local desde un punto de vista puramente descriptivo, ahora queremos descubrir el *propter quid*, esto es, las causas de los movimientos locales. Aunque el movimiento local es el más débil de los cambios que pueden sufrir las cosas naturales, tenemos razones para sospechar que el análisis causal se abre a una complejidad inabarcable. Pero para saber lo poco que podamos saber, hay que aferrarse al método científico, y comenzar por lo más simple y primero. Debemos empezar, por lo tanto, determinando cuál es el movimiento local más simple y primero, para investigar sus causas.

A. El primer movimiento

I. Naturaleza del primer movimiento

1º Primacía del movimiento local

Si ordenáramos las especies de cambios según su importancia física, tendríamos en primer lugar el *cambio substancial*, que afecta a las cosas en aquello mismo que son; luego sigue el *aumento* o cambio en la cantidad, como se ve mejor en las cosas vivas, cuando pasan de su primera constitución monocelular a la organización definitiva según su naturaleza; en tercer lugar están las *alteraciones*; y por último el *movimiento local*, que no es modificación intrínseca sino en relación a lo circundante.

Sin embargo, la observación física nos hace ver con claridad que, aun siendo el más simple, el primero de todos los cambios físicos es el movimiento local[1]. Esto se puede mostrar considerando la propiedad, la prioridad o el orden de los diversos movimientos:

Propiedad. La generación y el aumento – que son cambios según la substancia y según la cantidad – se hacen más patentes en las cosas vivientes, donde es más clara la unidad substancial. Mientras que las alteraciones y movimientos locales se dan en toda especie de substancia. Pues bien, si se considera lo propio de cada una de estas especies de cambios, se ve que unos preceden a otros y que el movimiento local los precede a todos:

- *A la generación precede el aumento*, tanto por parte del que genera como de lo engendrado. Porque para que el que genera pueda engendrar, tiene que alcanzar su perfecta dimensión: el brote debe hacerse árbol y el niño hombre. Y porque la generación presupone la suficiente dimensión de la materia de lo engendrado, como el árbol debe producir el fruto para que de él salga la semilla del nuevo árbol y la hembra debe producir el óvulo.
- *Al aumento precede la alteración*, pues el aumento sigue a la nutrición, que se produce por la alteración de los alimentos.
- *A la alteración precede el movimiento local*, pues para el caso de los vivientes, el alimento debe ser llevado al contacto con el que se nutre, lo que no puede ocurrir sin cierta traslación. Y en general, tanto los aumentos o disminuciones de la cantidad, como las alteraciones, no se producen sin algún movimiento local. De allí que *en el inicio de todo cambio siempre está el movimiento local*.

Prioridad. El movimiento local tiene prioridad de existencia, de tiempo y de perfección:

- *Prioridad de existencia*. Tiene prioridad de existencia aquello que debe existir para que lo demás exista, y que puede existir sin que exista lo demás. Ahora bien, como acabamos de ver, todos los demás cambios no pueden existir sin el movimiento local, pero el movimiento local puede darse sin generación, ni aumento, ni alteración ninguna, como cuando una asteroide se mueve en el espacio. Por lo tanto, el movimiento local tiene prioridad de existencia.
- *Prioridad de tiempo*. Como veremos, sólo el movimiento local puede ser perpetuo. Por lo tanto, si hubo en el tiempo un primer movimiento, tiene que haber sido el local.
- *Prioridad de perfección*. El movimiento más perfecto es aquel que es propio de las cosas más perfectas, y el que no presupone ninguna imperfección. Y en ambos aspectos tiene la primacía el movimiento local. Porque vemos que los minerales, más imperfectos, no tienen ningún movimiento propio; los vegetales, medianos en perfección, tienen movimientos propios de generación y aumento, pero no de traslación; mientras que los animales, más perfectos, tienen como propio el movimiento local, y sólo lo tienen los más perfectos de entre ellos. Además, el movimiento local no presupone ninguna imperfección; porque la generación y corrupción presuponen inexistencia (anterior o posterior); el aumento y la alteración presuponen imperfección en la cantidad o cualidad (anterior o posterior); mientras que el movimiento local, por ser cambio en el *ubi*, que es un accidente determinado en orden a lo puramente extrínseco, no presupone ninguna modificación intrínseca del sujeto mismo del cambio. De allí que el movimiento local sea propio de lo perfecto.

Orden. Como dijimos y se ve por experiencia, hay movimientos que tienen a otros movimientos como causa, por lo que se establece un orden causal de movimientos. Pero se hace evidente que lo primero en el orden de los movimientos será aquello que no es movido por otro sino que se mueve a sí mismo. Ahora bien, por lo último que dijimos y según lo que se observa en las cosas naturales, lo que se mueve a sí mismo lo hace según el movimiento local:

[1] En los dos últimos libros de su tratado de *Física*, séptimo y octavo, Aristóteles discute acerca de la existencia y naturaleza del primer movimiento y del primer motor en el orden de los cambios físicos. Expone allí *principios inmutables* que debemos tener en cuenta, y *observaciones mudables* que debemos tomar o dejar según lo que se haya podido observar con mayor precisión. En el L. VIII, c. 7 (lección 14 del comentario de Santo Tomás) defiende la primacía del movimiento local, según aquí exponemos.

- Es razonable, como dijimos, porque el movimiento local no presupone, por sí mismo, ninguna modificación intrínseca del sujeto, por lo que no va contra el principio de causalidad que algo se mueva a sí mismo según este movimiento, pues no se hace por ello más perfecto. Sería contradictorio decir que algo se perfecciona a sí mismo por sí mismo.
- Se observa que los entes naturales más perfectos, los animales, se mueven a sí mismos según movimiento local; y se observa también que el único movimiento que los minerales, entes naturales más imperfectos, no se causan a sí mismos pero sí conservan por sí mismos, es el movimiento local.

Por lo tanto, el movimiento local es el primero en el orden de todos los movimientos.

Conclusión. Todas estas razones, consideradas ahora un poco más en detalle, nos aseguran que no hemos ido desencaminados al considerar al movimiento local como primer movimiento, y al abocarnos a su consideración de manera previa y separada.

2º Perpetuidad del movimiento local

Como dijimos al comienzo, el gran problema que plantea la realidad física es la universalidad y perpetuidad de los procesos de cambios. Todo cambia y se mueve incesantemente, desde los siglos y para todos los siglos, *in saecula saeculorum* sin parar. Es lo que muestra al menos la realidad física. Ahora bien, por poco que se considere es claro que el único movimiento que puede ser perpetuo es el movimiento local:

- Las generaciones y corrupciones son cambios que terminan en la existencia o inexistencia, por lo que no sólo no son perpetuos, sino que ni siquiera permanecen un tiempo: son instantáneos.
- Aunque el aumento y la disminución se dan de modo continuo en el tiempo, no pueden ser perpetuos, porque las substancias tienen una cantidad mínima y máxima, fuera de las cuales no pueden existir. El gordo engorda hasta la explosión y el flaco enflaquece hasta el cadáver.
- Las alteraciones tampoco pueden ser perpetuas, pues se dan entre contrarios de especie determinada. Lo que se emblanquece termina en lo perfectamente blanco, y lo que ennegrece en lo perfectamente negro, sin poder ir más allá. Las alteraciones pueden sucederse perpetuamente, como el cometa que se calienta y enfría según se acerca y aleja del sol, pero es sucesión de movimientos contrarios, con causas contrarias, y no un mismo movimiento perpetuo.

Sólo el movimiento local puede ser perpetuo, pues el lugar no tiene por sí mismo contrariedad, por lo que no supone necesariamente perfección o imperfección del sujeto. El sol gira desde los siglos en torno a la tierra, o la tierra en torno al sol, y puede seguir igual por muchos siglos más. Por lo tanto, la perpetuidad del cambio que se observa en la naturaleza tiene evidentemente como primer motor intrínseco al movimiento local.

3º El primer movimiento es circular

El primer movimiento de un proceso perpetuo de cambios, tal como se observa en la realidad física, debe ser necesariamente circular. Sobre esto haremos una argumentación general que luego habrá que comprobar en particular.

Un proceso de cambios que fuera hacia lo más perfecto o hacia lo menos no puede ser perpetuo, porque las cosas tienen un modo de ser determinado según sus naturalezas, por lo que la perfección tiene término en la plenitud, y la imperfección lo tiene al menos en la corrupción. La idea de un evolucionismo hacia estados siempre superiores de la naturaleza es un falso mito que contradice lo que se observa en la realidad natural. La experiencia muestra que los procesos naturales tienden a que las cosas permanezcan siendo lo que son, y se mueven constantemente para superar la constante tendencia a la corrupción:

- Así como cada especie vegetal y animal tiene un dinamismo cíclico que la lleva a volver siempre sobre lo mismo, perpetuando la existencia de la especie en reparación de la corrupción de los individuos, así también de manera análoga – pues el arte imita la naturaleza – las sociedades humanas tienden a transmitir su sabiduría, sus virtudes, sus instituciones para perpetuarse en su plenitud, superando la erosión del tiempo.
- En los procesos de los minerales se observan ciclos que se dirigen a conservar las cosas en su ser, tanto en lo que se ve a simple vista: ciclos en el aire y en el agua, como en lo macroscópico: ciclos de planetas y estrellas, y en lo microscópico: la agitación molecular y atómica.

De allí que dijera el Sabio: “Una generación va, otra generación viene; pero la tierra permanece donde está. Sale el sol, se pone el sol; corre hacia su lugar y de allí vuelve a salir. Sopla hacia el sur el viento y gira al norte; gira que te gira el viento, y vuelve el viento a girar. Todos los ríos van al mar y el mar nunca se llena; al

lugar donde los ríos van, allá vuelven a fluir. Todas las cosas cansan. Nadie puede decir que no se cansa el ojo de ver ni el oído de oír. Lo que fue, eso será; lo que se hizo, eso se hará. Nada nuevo hay bajo el sol. Si de algo se dice: «Mira, eso sí que es nuevo», aun eso ya sucedía en los siglos que nos precedieron" (Eclesiastés 1, 4-10).

Considerando las cosas en especial para el movimiento local, se hace claro que sólo un movimiento de tipo rotatorio o cíclico puede hacerse perpetuamente sobre sí mismo, sin aumento ni disminución de perfección, dirigido a la conservación en la existencia y en el mismo estado. El movimiento de traslación no puede darse al infinito, porque no hay dimensiones infinitas; y tampoco puede darse un ciclo de idas y vueltas que sea primer movimiento, como por ejemplo un movimiento pendular o de oscilación elástica, pues supone diversos movimientos con detenciones intermedias que exigen diversidad de causas[1]. Los físicos modernos tienden a poner el primer movimiento del universo en una primera expulsión, el Big Bang, a lo que respondería cierta expansión actual de los cuerpos celestes, pero saben muy bien que si no se pone una rotación inicial, no se explica la permanencia actual de las cosas.

En conclusión, el primer movimiento es local, y se mueve a sí mismo por cierta circularidad. Ahora bien, lo que se ve moverse a sí mismo en el movimiento local es lo que desde Newton se ha dado en llamar *movimiento inercial*, el cual puede ser de rotación, pero también de traslación. Se ve, entonces, que por allí debemos comenzar nuestra investigación causal.

II. EL PRIMER MOVIMIENTO Y LA CAUSALIDAD

Habiendo precisado cómo es el primer movimiento, queremos determinar cómo debe ser su causa. Pero como dijimos que el primer movimiento se mueve a sí mismo, en primer lugar conviene decir en general qué implica moverse a sí mismo.

1º Las exigencias causales de lo que se mueve a sí mismo

El principio de causalidad sostiene que todo lo que cambia tiene causa. En especial, todo cambio debe tener una causa que lo produzca, es decir, una causa eficiente, porque si el cambio es real, supone cierta novedad en el ser de la cosa, que tiene que ser producida o puesta por algo. Como dijimos, en el cambio local la novedad es mínima, sólo una nueva relación con las cosas circundantes, pero si el cambio de lugar es real, alguna causa tiene que haber intervenido, pues nada viene a la existencia por sí mismo.

Como enseña Aristóteles al inicio del libro séptimo de la *Física*, del principio de causalidad se sigue que nada puede moverse a sí mismo como un todo, dándose a sí mismo un nuevo modo de ser, como nada puede darse a sí mismo la existencia, porque supondría que algo puede dar lo que no tiene, adquirir por sí lo que por sí no posee. Hay, sin embargo, muchas cosas que se mueven a sí mismas en diversos órdenes de movimientos:

- El discípulo recibe la ciencia del maestro, quien lo mueve a perfeccionarse en ella; pero hay quienes adquieren la ciencia por sí mismos sin maestro.
- Hay cosas que nos mueven eficazmente a quererlas, pero respecto de muchas tenemos libertad de quererlas o no, y nos movemos nosotros mismos a hacerlo.
- La semilla se mueve a sí misma a hacerse árbol, disponiendo de las sustancias de la tierra según su conveniencia.
- El gato se mueve a sí mismo para huir del perro, y el perro para perseguirlo.

Pero ninguna de estas cosas se mueve a sí misma como un todo, sino que siempre es una parte la que mueva a otra:

- El que adquiere la ciencia por sí mismo lo hace en la medida en que saca conclusiones de ciertos principios evidentes *per se*. En el movimiento intelectual, entonces, el conocimiento de los primeros principios mueve a conocer las conclusiones, y el conocimiento de las conclusiones se hace principio motor de nuevas conclusiones.
- Somos libres para movernos a querer esto o aquello, pero lo hacemos en la medida en que nuestra voluntad se mueve necesariamente a querer lo bueno en universal, que hallamos en particular en esto o aquello. En el movimiento apetitivo, entonces, el querer del fin último mueve al querer de los medios, y el querer de los medios se hace fin del querer de otros medios.
- El embrión de oso se mueve a sí mismo para llegar a ser oso hecho y derecho, pero el primer motor de este movimiento es el alma del oso, que existe actualmente desde la concepción. En el movimiento

[1] Todo esto es discutido de manera exhaustiva por Santo Tomás en su comentario a Aristóteles.

vital, entonces, el alma mueve los órganos celulares para formar los órganos corporales, y por los órganos corporales mueve para sostener la vida por la nutrición y propagarla por la generación.

- En el movimiento local de los animales, las patas traseras mueven lo de adelante y luego las delanteras mueven lo de atrás o, en los que no tienen patas, cierta dilatación empuja lo de adelante y una contracción trae lo de atrás.

La **primera exigencia**, entonces, de lo que se mueve a sí mismo es que no puede moverse como un todo sino que *una parte mueve otra parte*. Y la **segunda exigencia** es que, considerada la cosa en su totalidad, *no alcanza ninguna novedad que no posea de alguna manera*, porque nada puede ir más allá de lo que tiene, no puede crecer en perfección total, sino sólo en cierto aspecto parcial. En lenguaje escolástico diríamos que lo que se mueve a sí mismo no se perfecciona *simpliciter* sino sólo *secundum quid*:

- La conclusión de un silogismo no dice nada que no esté ya en los principios, de allí que en el movimiento intelectual nunca puede irse más allá de lo que ya se conoce virtualmente en los primeros principios.
- La bondad de todo fin inmediato o de todo medio es una bondad parcial que está comprendida en la bondad universal del fin último, de allí que en el movimiento apetitivo no se quiere más que lo que ya está en el amor del fin último. En cierta manera al elegir un medio no se empieza a querer nada nuevo.
- El alma del viviente obra sobre la organización corporal imponiéndole una perfección que ella ya tiene de manera inmaterial, de allí que en la constitución del animal no se alcanza más perfección que la que ya está en el principio vital o alma.
- Ni el gato trepa ni el perro salta más allá de lo que puede la energía de sus músculos.

En el movimiento inercial tienen que darse necesariamente algo semejante.

2º Las exigencias causales del movimiento inercial

Los físicos han investigado las condiciones que provocan el movimiento local, y han podido reducirlas a cuatro, dos de evidencia más directa y otras dos que se determinan a partir de ciertos efectos. Las dos primeras corresponden a los fenómenos gravitatorio-inerciales y electromagnéticos, y las dos últimas se han denominado fuerzas nucleares fuerte y débil.

Parece haber un acuerdo general en considerar que las influencias más generales y primeras del movimiento local son las gravitatorio-inerciales, pues dependen de la masa, que es una propiedad muy general de los cuerpos naturales. Algunos quizás quieran considerar inercia y gravedad como dos manifestaciones de una misma propiedad. A primera vista no parece fácil identificarlas – luego trataremos este asunto –, por lo que, siguiendo a Newton en su primera ley de la mecánica, plantearemos como fenómeno más simple al del movimiento puramente inercial, comenzando por aquí.

Consideremos, como situación más simple, la de un cuerpo en el espacio fuera de toda influencia gravitacional. Sabemos por experiencia que, si está en movimiento, lo conserva en la misma dirección y a la misma velocidad. Los antiguos veían que el impulso de los proyectiles no se conservaba, pero no tenían la experiencia del movimiento en el espacio vacío. Ahora que tenemos hasta astronautas en órbita, sabemos que se conserva.

Esta podría considerarse como una situación de movimiento primero de algo que se mueve a sí mismo. Analicémoslo como si así fuera. Si comparamos las dos exigencias del movimiento de lo que se mueve a sí mismo, tal como las presenta una buena inteligencia del principio de causalidad, con lo que sostienen los físicos modernos, vemos que en la segunda, al menos, estamos de acuerdo. La primera ley de Newton dice: *Un objeto tiene una velocidad constante a menos que exista una fuerza que actúe sobre él*. Aunque hay que ver mejor qué es una fuerza, se reconoce que el cuerpo sólo conserva el movimiento que posee, y que cualquier variación viene de una acción externa.

Pero la física moderna no va más allá de los sentidos en el planteo causal, y no se preocupa por el axioma fundamental de la causalidad: *todo lo que se mueve es movido por otro*, que para el caso de algo que se mueve a sí mismo exige que una parte mueva a otra. Esto no puede faltar para el movimiento inercial, y si a los físicos les cuesta verlo, es porque no quieren tener en cuenta al espacio vacío como medio del movimiento. La primera exigencia del movimiento inercial se cumple, evidentemente, teniendo en cuenta la interacción del cuerpo con el medio en que se mueve. Es la explicación que en su momento dio Aristóteles, que aunque no tenía observado la existencia del espacio vacío o éter y lo explicaba más bien por relación al aire circundante al cuerpo, no dejó de darla en general[1].

[1] Aristóteles, *Física*, libro IV, c. 8 (215 a 14-19): "Los proyectiles se mueven aunque lo que los impulsó no esté ya en contacto con ellos, o bien por *antiperístasis*, como suponen algunos [cf. Platón, *Timeo* 59 a], o bien porque el aire que ha sido empujado los empuja con un movimiento

El éter, como lo muestra más claramente la atracción gravitacional, se comporta de una manera que tiene cierta semejanza con un medio elástico, de modo que el movimiento inercial debe explicarse a la manera de un pulso en un medio elástico, que avanza por acción y reacción con el medio (al modo como se mueven las olas en el mar). Se da, entonces, la circularidad que supone un primer movimiento, pues la transmisión de un pulso en un medio elástico supone el movimiento oscilatorio (circular) de cada una de las partes contiguas. Y como la inercia se ve depender exclusivamente de la masa del cuerpo, como pasa con la gravitación, hay que concluir que la influencia sobre el medio que sostiene el movimiento inercial es la misma que la que provoca la gravedad. Por eso, como se hizo patente a todos después de Einstein, inercia y gravedad no deben considerarse fenómenos independientes.

Este análisis nos confirma en lo que ya se veía por otros argumentos, y es que el éter debe considerarse inmóvil. Porque si el éter a su vez se mueve, ¿qué lo mueve y respecto de qué se mueve? Sufre evidentemente la influencia de la masa corporal, alterando su cualidad respecto de ella, como el agua de mar que baja y sube de nivel, pero sin cambio de ubicación.

Después de este análisis inicial – novedoso para un físico moderno, pero por culpa de los defectos de su método científico y no por ninguna agudeza mental nuestra, que sólo respondemos a los principios primeros de la física tal como los expuso Aristóteles hace tiempo – quedan muchas cosas por investigar. Lo primero es precisar en qué consiste la menor o mayor perfección en orden al movimiento local, lo que nos permitirá decir qué se explica por movimiento propio y cuándo hay intervención de un agente exterior. Luego seguirá lo demás.

III. LA ENERGÍA CINÉTICA

1º Positividad natural del movimiento

Como vimos al distinguir las especies de movimiento, el movimiento según el lugar no tiene por sí mismo ninguna contrariedad que permita distinguir generación de corrupción cinética, es decir, un sentido de mayor o menor perfección en el orden del movimiento local[1]. Para que pueda señalarse este sentido es necesario considerar el movimiento en orden a la naturaleza de las cosas, porque sólo entonces podrá decirse si va a favor de la naturaleza o en contra. Ahora bien, el movimiento local puede considerarse en relación a la naturaleza en particular o en general. Considerado en orden a una naturaleza *particular*, cada cosa tiene su lugar propio y natural, respecto del cual puede valorarse su movimiento. Los vegetales se mueven a los lugares de mayor luz, pues se alimentan por fotosíntesis, y los animales a los lugares de nutrición o procreación, que para muchos varían en invierno y verano, por lo que migran según las estaciones. Pero a nosotros ahora nos interesa una consideración *general* de las cosas naturales en cuanto entes móviles.

Si consideramos las cosas en cuanto simples cuerpos, dotados de extensión y masa, sin tener en cuenta la complejidad del orden natural, veremos – al considerar la gravedad – que los cuerpos tienden por naturaleza a

---

más rápido que el que los desplaza hacia su lugar propio. Pero en el vacío ninguna de estas cosas puede ocurrir, ni algo puede desplazarse a menos que sea transportado".

Ibíd., libro VIII, c. 10 (266 b 27 - 267 a 21): "Antes de seguir adelante conviene examinar mejor una dificultad sobre el movimiento de los cuerpos. Si todo lo que está en movimiento es movido por algo, ¿cómo algunas cosas que no se mueven a sí mismas, como los proyectiles, continúan moviéndose cuando el moviente ya no está en contacto con ellas? Si decimos que en tales casos el moviente mueve al mismo tiempo otra cosa, como el aire, y que éste al ser movido también mueve [como un engranaje mueve otro engranaje], entonces sería igualmente imposible que el aire continúe en movimiento sin que el moviente originario esté en contacto y lo mueva, pues todas las cosas movidas tendrían que estar en movimiento y dejar de estarlo cuando el primer moviente deje de moverlas, incluso aunque el moviente mueva como la piedra magnética, que hace que lo movido también mueva [el imán atrae el clavo, pero el clavo se imanta y atrae otro clavo, éste a un tercero]. Pues bien, sobre esto hay que decir lo siguiente: que lo que primero ha movido hace que también mueva el aire o el agua o cualquier otra cosa [como el éter] que por naturaleza pueda mover a otra o ser movida por otra; pero no dejan de mover y ser movidas al mismo tiempo, porque aunque dejan de ser movidas cuando el moviente deja de moverlas, pueden todavía seguir moviendo [como un elástico, que después de ser movido queda capaz de mover]; y por eso puede ser movida otra cosa que esté en contigüidad con ellas, y de ésa se puede decir lo mismo [así se transmite el movimiento en un medio elástico]. Pero comienza a dejar de mover cuando disminuye la fuerza motriz transmitida a las cosas que están en contigüidad [por fricción o dispersión por entropía], y cesa finalmente de mover cuando el moviente anterior ya no hace que sea moviente, sino sólo movido. Y entonces el movimiento de ambos, el del último moviente y el de la cosa movida, tiene que cesar simultáneamente, y con ello el movimiento total [lo que se ve que no ocurre en el éter por no haber dispersión alguna]. Ahora bien, las cosas a las que se transmite este movimiento son cosas que pueden estar a veces en movimiento y a veces en reposo [como pasa con las diversas partes del medio elástico], pero este movimiento no es continuo, aunque parezca serlo; pues es un movimiento de cosas que están en sucesión o en contacto, ya que no hay un único moviente, sino cosas que son contiguas entre sí [las diferentes partes del medio elástico]. Y por eso tal movimiento, que algunos llaman *antiperístasis*, tiene lugar también en el aire y en el agua. *Pero es imposible resolver el problema planteado de otra manera que la que hemos dicho*. En una antiperístasis, en cambio, las cosas son movidas y mueven al mismo tiempo, por lo que sus movimientos tendrán que cesar al mismo tiempo. Pero en este caso tenemos la apariencia del movimiento continuo de algo singular y, como no se mueve por sí mismo, la pregunta es: ¿qué es lo que lo mueve?"

[1] Cinético significa relativo al movimiento local, pues κινέω en griego significa mover localmente.

estar reunidos y quietos, con la menor extensión y la mayor densidad, lo que supone la máxima vigencia de la corporeidad. El ideal de la corporeidad es llegar a ser lo que los modernos astrónomos llaman un «agujero negro». En esta consideración, vemos que la unificación gravitatoria se opone a la dispersión inercial como el extremo positivo al extremo contrario negativo.

Pero esta tendencia al triunfo de la corporeidad es mortal enemiga del orden natural, porque impide y destruye la complejidad de las naturalezas. Para que exista el orden de las diversas especies naturales y cada una pueda organizar su corporeidad de acuerdo a las exigencias de su naturaleza, es necesario vencer constantemente la tendencia a la quieta unificación corporal, teniendo la capacidad de mover las partes corporales y disponerlas según conveniencia. Teniendo en cuenta, entonces, no solamente la simple corporeidad de las cosas, sino el orden de las diversas especies naturales, de los dos opuestos de gravedad e inercia, el que debe considerarse más positivo es éste último, pues compensa la unificación gravitacional y permite la existencia y actividad de los cuerpos complejos. Si el universo no se ha destruido en un colapso cósmico, se debe justamente a que los cuerpos están en movimiento y lo conservan. Sin el movimiento que nos impulsa a huir del sol, ya nos habría devorado con su masa y digerido con su calor. Por lo tanto, se comprende que en la base y fundamento de todos los procesos naturales haya una agitación permanente, que se opone y vence la tendencia de muerte de la gravedad. Aunque, por supuesto, el movimiento inercial sin el freno de la gravedad provocaría también la extinción del universo por dispersión.

Volvemos, entonces, a lo que venimos anunciando: no debe entenderse la inercia sin la gravedad. Son dos fenómenos que se compensan y que manifiestan tener el mismo fundamento, pues ambos dependen de la masa corporal. Pero para la existencia y actividad del orden natural se necesita el movimiento inercial, siendo mejor y positivo que el movimiento inercial sea mayor. Aunque normalmente a un movimiento se lo juzga por su término *ad quem*, en esta consideración inicial en que no tenemos en cuenta ninguna naturaleza en especial sino todas en general, lo que se precisa es tener impulso de movimiento que evite el congelamiento corporal. Como advertimos más arriba, en esta consideración física inicial no se tienen en cuenta los fines de los movimientos, sino sólo los agentes, y el impulso inercial se muestra como el principal de ellos.

Al mayor o menor grado de movimiento inercial se lo ha denominado convenientemente «**energía cinética**». Ενέργεια en griego significa actividad, cierta virtud actualmente ejercida, por oposición a δύναμις, que significa virtud en potencia de ejercerse. Como vimos, el movimiento es acto: no es acto pleno, pues lo que se mueve localmente está en potencia a un nuevo lugar, pero es acto y actividad.

2º Definición de energía cinética

El concepto de energía se halla muy difundido en nuestra vida moderna. Se habla de diversas fuentes de energía: de energía eléctrica, eólica, solar, nuclear, etc., y se entiende que la energía de alguna manera se consume. La energía hace a la vida de una nación, es como una riqueza principal que tiene que ver con un aspecto vital fundamental: el movimiento. La energía tiene que ver de un modo u otro – lo iremos viendo – con el movimiento: es lo que hace que las cosas se muevan. De allí que podamos decir, en general, que la energía es cierta *capacidad de mover*. Aunque por ahora no nos preguntamos cómo puede mover la electricidad, o el viento, o el sol, o los núcleos de los átomos, sino cómo puede moverse un cuerpo a sí mismo o a otros cuerpos. De allí que hablemos de energía del mismo movimiento o *energía cinética*.

Pues bien, la energía cinética es *la capacidad de mover que adquiere un móvil en su relación al medio por haber sido movido*, virtud por la que puede moverse a sí mismo o mover a otro. Expliquemos esta definición.

Capacidad adquirida. Así como la ubicación de un cuerpo es algo real en el cuerpo, pues no es lo mismo estar en un lugar que en otro (realidad que depende de los cuerpos circundantes), así la energía cinética es también algo real, que se reduce al género de la ubicación como el acto imperfecto se reduce al perfecto, pues es lo que actualmente adquiere un cuerpo por ser movido respecto del medio en que se mueve. Y esta entidad cinética adquirida es la que explica que el cuerpo pueda a su vez moverse a sí mismo o mover otra cosa, por lo que no la consideramos tanto como efecto de haber sido movido, sino como causa de nuevo movimiento, de allí que la denominemos *capacidad*, esto es, *potencia activa* de movimiento. Todo acto o perfección adquirida puede ser a su vez potencia activa de una nueva acción.

Del móvil en su relación al medio. Por una parte, no tiene sentido hablar de la ubicación de un cuerpo y de cambio de lugar como algo real si no se tiene en cuenta el medio respecto del cual se mueve. Cuando un físico considera un cuerpo que se mueve en el espacio, y trata al espacio como una nada extensa, podrá describir matemáticamente el movimiento, pues la extensión tiene cantidad, pero no podrá hablar físicamente, pues no está tomando en cuenta la naturaleza de las cosas, del cuerpo y del medio. Por otra parte, como dijimos, nada puede

moverse a sí mismo como un todo, por lo que el movimiento siempre debe producirse de una cosa en otra: el móvil mueve al medio y el medio mueve al móvil, al modo como el acróbata flexiona el trampolín y el trampolín impulsa al acróbata. Denominamos energía cinética a lo que se da en el móvil, que es el que se mueve con movimiento local, pues el medio está quieto y sólo se mueve por cierta alteración en su relación al móvil.

Por haber sido movido. La causa eficiente de la energía cinética es aquello que movió el cuerpo, ya sea su mismo estado de movimiento anterior, que lo hace capaz de mover, ya sea otro agente motor. Si lo que mueve un cuerpo es su mismo estado de movimiento anterior, el principio de causalidad exige que su movimiento no sea mayor ni distinto del movimiento anterior. El movimiento en un medio con masa, como el aire o el agua, se ve que es menor, pues el cuerpo no sólo se mueve a sí mismo, sino también a los cuerpos que desplaza en su movimiento; pero el movimiento en el éter se mantiene sin disminución, por lo que parece un medio perfectamente elástico (aunque las investigaciones de la mecánica cuántica ponen esto en discusión). Si se observara un aumento o diferencia en el movimiento del cuerpo, hay que atribuirlo a la intervención de un agente externo al mismo cuerpo, como reza la primera ley de Newton.

Queda por investigar cómo se da la acción y reacción mutua y continua entre el cuerpo y el medio, cuyo principio de solución lo indica la gravedad, donde se pone de manifiesto la virtud que un cuerpo influye en el espacio para mover a otros cuerpos. Si un cuerpo puede comunicar al medio la virtud de mover otros cuerpos, se explica que se la comunique para moverse a sí mismo. Dejamos estas consideraciones para cuando estudiemos la inercia en relación con la gravedad.

3º La mensura de la energía cinética

La energía cinética de un cuerpo en movimiento, como se ve, es una entidad que se da con más y menos. Como toda *capacidad o virtud*, puede medirse por la magnitud de sus efectos. O también, por cuanto es una capacidad del cuerpo *adquirida por haber sido movido*, puede medirse por la magnitud del esfuerzo por moverlo.

Supongamos una situación de nuestra experiencia habitual que se acerque a la del movimiento de un cuerpo en el espacio, como la de empujar un automóvil liviano para que arranque (proceso habitual al menos en Argentina, donde se hace durar mucho a los autos). Si rueda en un plano horizontal, podemos olvidarnos de la gravedad. Medimos de alguna manera la energía cinética del cuerpo observando cómo varía su estado de movimiento de acuerdo a la magnitud del esfuerzo que se hace para moverlo. A esfuerzo doble, triple, cuádruple, ¿qué se observa en el movimiento resultante?

Masa. Vemos que, con buenas condiciones de deslizamiento y si podemos despreciar la oposición del aire, la magnitud del esfuerzo que hay que poner para llevar el cuerpo a cierta velocidad no depende de la extensión del cuerpo, sino solamente de su *masa*[1]: para alcanzar la misma velocidad final, a mayor masa se necesita hacer mayor esfuerzo, y a menor menor. Es más, dentro de los márgenes de las velocidades que caen bajo nuestra observación inmediata, se ve que hay una relación de *proporción directa* entre la masa y el esfuerzo: si por el esfuerzo de un hombre, un vehículo de cierta masa es llevado a determinada velocidad, para llevar a la misma velocidad un vehículo de masa doble, se necesitan dos hombres. Esto supone que, de dos cuerpos que van a la misma velocidad, tiene mayor energía cinética el que tiene mayor masa. Y que, por lo que se puede observar, la energía cinética es directamente proporcional a la masa del cuerpo:

$$Energía\ cinética \propto masa\ corporal$$

Dejemos sentado que esta proporción directa vale dentro de los márgenes de lo que se puede observar. Así como para el movimiento en el aire se observa esta proporción en velocidad bajas, pero deja de observarse para velocidades altas, pues el movimiento en un medio elástico depende de las propiedades elásticas del medio, teniendo normalmente una velocidad máxima que no se puede superar (como en el aire se hace imposible superar velocidades muy superiores a las del sonido); así también es de esperar que el movimiento en el éter, que se ve comportarse a la manera de un medio elástico, tenga una velocidad máxima que no se pueda superar. Y de hecho parece ser así, pues los cuerpos parecen no poder llegar a la velocidad de la luz, comportándose como si fueran cada vez más pesados en la medida en que se acercan a esta velocidad máxima.

Velocidad. La energía cinética depende también, evidentemente, de la velocidad que tiene un cuerpo, siendo mayor cuando tiene mayor velocidad y menor cuando menor. Pero aquí se observa una diferencia, pues si

---

[1] Para velocidades o extensiones muy grandes la oposición del aire se hace determinante. La velocidad máxima de un auto de carrera depende en gran medida de su diseño aerodinámico; y para un avión, la velocidad final depende más de la extensión que de la masa. Y para velocidades pequeñas se hacen determinantes las extensiones muy amplias, como no se hace nada fácil empujar un velero de ruedas con la vela desplegada. En el espacio exterior las dimensiones no importan nada, sólo la masa.

el esfuerzo de un hombre pone un vehículo liviano a 10 km/h, para llevarlo al doble de la velocidad no basta otro hombre, sino que hacen falta cuatro para hacerlo. Y para llevarlo a 40 km/h no hay hombres que alcancen, porque no son capaces de seguir empujando cuando el auto pasa los 20 km/h, pues no corren tan rápido. Para eso hay que empujar con otro auto. Si lográramos resolver el problema práctico de medir la velocidad final en relación al esfuerzo que se hace para mover un cuerpo (con hombres habría que hacerlo con precisión para velocidades muy bajas, para velocidades mayores tendríamos que usar caballos, y para velocidades más altas podríamos tirar con motos), comprobaríamos que para alcanzar el doble de velocidad hay emplear el cuádruple de esfuerzo, y para una velocidad 4 veces mayor, el esfuerzo debe multiplicarse por 16. Se ve pues que, por alguna razón, la energía cinética es proporcional a la velocidad doblada del cuerpo:

$$Energía\ cinétia \propto velocidad \times velocidad$$

Cualquiera que maneje automóviles sabe que no hace falta mucho motor para pasar de 10 a 50 km/h en unos segundos, pero que hace falta un motor poderosísimo para pasar de 100 a 140 km/h en el mismo tiempo. Esto es así porque la energía cinética depende de la velocidad por doble razón, lo que en lenguaje matemático se dice que depende de la velocidad al cuadrado: $E_c \propto v^2$ De allí que el aumento de energía cinética que debe proporcionar el motor para aumentar 40 km/h en velocidades bajas, es muy distinto para velocidades altas. Podemos expresar esta proporción en general: $\Delta E \propto (v + \Delta v)^2 - v^2 = v^2 + 2v \Delta v + \Delta v^2 - v^2 = (2v + \Delta v) \Delta v$

La proporción del aumento de energía para un aumento de 40 km/h a una velocidad de 100 km/h respecto de una velocidad de 10 km/h viene dado por la siguiente fracción:

$$\frac{\Delta E_{100}}{\Delta E_{10}} = \frac{2 \times 100 + 40}{2 \times 10 + 40} = \frac{240}{60} = 4$$

Hace falta un motor cuatro veces más potente para aumentar 40 km/h yendo a 100 km/h que lo necesario para 10 km/h en el mismo lapso de tiempo. ¿Por qué la energía cinética depende por doble razón de la velocidad? Para responder a esto, que no es difícil verlo, habrá que considerar mejor a los agentes o motores del movimiento local, explicando con mayor precisión lo que aquí hemos denominado *esfuerzo*.

Conclusión. La energía cinética puede medirse por su relación con la masa y la velocidad del móvil y, por lo que se puede observar, depende en proporción simple de la masa y en proporción doble de la velocidad:

$$Energía\ cinética \propto masa \times (velocidad)^2$$

B. Los agentes del movimiento local

Debemos analizar de una manera general a los agentes del movimiento local, que son aquellos que pueden dar o aumentar la energía cinética de un cuerpo. Nos conviene hacerlo en dos pasos, explicando dos nociones que la física moderna ha llamado acertadamente *fuerza* y *trabajo*.

I. LA NOCIÓN DE FUERZA

1º ¿A qué se llama «fuerza»? Definición nominal

Los cuerpos tienden a estar unidos y quietos, de manera que cuando queremos sacarlos de su amigable tranquilidad tenemos que hacer *fuerza* sobre ellos, así al menos solemos decir. Y también tenemos que hacer fuerza para que ciertas cosas que tienden a moverse no se muevan: para que el perro no corra a pelearse con el del vecino, o para que no se nos caiga el techo en la cabeza. Se entiende que hablamos de *fuerza física*, pues la palabra fuerza se usa también en otros sentidos, como en sentido moral: fuerza de voluntad, virtud de fortaleza; o referida a otros aspectos: un color, sonido, olor o sabor fuerte, una fuerte relación de amistad, etc. Si se piensa un poco, se ve que la fuerza física siempre tiene que ver con el movimiento local, pues se trata siempre de mover o de que no se mueva.

La palabra *fuerza* procede del adjetivo latino *fortis*: fuerte, vigoroso, el cual viene a su vez del verbo *fero*, que significa llevar (del griego φέρω, que tiene el mismo significado). Como se ve, ya desde su primer sentido etimológico, fuerza y fortaleza significa capacidad de llevar o mover localmente.

Por *fuerza física*, entonces, entendemos cierta acción de un cuerpo sobre otro por la cual lo saca de su estado propio de ubicación y movimiento. La fuerza supone siempre cierta oposición del otro cuerpo, en lo que aparece cierto carácter violento por el que se cambia el estado y tendencia natural del otro cuerpo.

2º La mensura de la fuerza: momento e impulso

Tanto las acciones como las potencias activas se miden y juzgan por sus efectos. Una *fuerza* – hablamos en adelante de fuerza física – se ordena a producir o impedir un *desplazamiento local*. Por lo tanto, una primera propiedad que tenemos que atribuir a toda fuerza, es la que le viene de estar referida al desplazamiento local: tiene *dirección y sentido*. Si queremos que algo se mueva hacia adelante, tenemos que hacer fuerza hacia adelante, y cuando queremos que algo no se mueva, tenemos que hacer fuerza en el sentido contrario al que se quiere mover.

Las fuerzas también tienen más y menos, por lo que se les puede atribuir cierta magnitud. Como veremos, el peso de los cuerpos se debe a la gravedad, y si queremos sostenerlos para que no caigan, hay que aplicar una fuerza en la dirección contraria al desplazamiento natural. De allí que las fuerzas se puedan medir por comparación al peso gravitatorio de los cuerpos. Pero, como todavía no tratamos de la gravedad, podemos medirlas también por sus efectos en el movimiento inercial.

Como dijimos y es evidente, no es lo mismo mover un cuerpo de poca masa que uno de masa mayor, por lo que hay que decir que, para igualdad de desplazamientos, para un cuerpo de masa menor o mayor se necesita hacer una fuerza menor o mayor. Es más, como señalamos al hablar de la energía, se puede comprobar que la fuerza a aplicar es simplemente proporcional a la masa: $Fuerza \propto masa$

El otro efecto a tener en cuenta en el movimiento puramente inercial es la velocidad. Podemos comprobar que hay que hacer fuerza para aumentar la velocidad, pero no para mantenerla (en la medida en que pueda despreciarse el freno por fricción). Pedaleamos con fuerza en la bicicleta para acelerar, pero luego descansamos moviéndonos a la misma velocidad. Entonces, lo que mide la magnitud de una fuerza en cierto desplazamiento no es la velocidad, sino el aumento de velocidad, porque para que se mantenga la velocidad basta la inercia y no hace falta esfuerzo.

De allí que los físicos hayan utilizado un parámetro para caracterizar el estado de movimiento de un cuerpo, al que denominan *momentum* (*momento*) – que es contracción de *movimentum,* y significa movimiento, cambio ligero, y de allí intervalo corto de tiempo o momento – y que consiste en el producto de la masa por la velocidad de un cuerpo: $\vec{p} = m\vec{v}$ Como señalamos, es magnitud vectorial porque lo es la velocidad. La fuerza, entonces, se relaciona con los cambios del momento de un cuerpo, y se puede observar que es directamente proporcional a la variación del momento: $\vec{F} \propto \frac{\partial \vec{p}}{\partial t} = \frac{\partial (m\vec{v})}{\partial t}$ Como además se denomina *impulso* al producto de una fuerza por el intervalo de tiempo que se aplica sobre un cuerpo, tenemos la siguiente proporción: $\vec{F}\partial t \propto \partial \vec{p}$ La variación del momento de un cuerpo es proporcional al impulso de la fuerza que se aplique sobre él.

Según lo que se observa ordinariamente, la aplicación de una fuerza no cambia la masa de un cuerpo, sino sólo su velocidad. Aunque parece que para velocidades muy altas, cercanas a la velocidad de la luz, esto no es así y varía también la masa, pero dejemos esto de lado por ahora. Suponiendo la masa constante, la aplicación de una fuerza se traduce en variación de velocidad, que no es otra cosa que aceleración:

$$\vec{F} \propto \frac{\partial \vec{p}}{\partial t} = m\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = m\vec{a}$$

Es fácil observar que una fuerza constante causa una aceleración constante, y que doble fuerza causa doble aceleración en el mismo cuerpo. Si midiéramos el empuje del respaldo del asiento sobre nuestras espaldas en el tiempo en que despega el avión, podríamos comprobar esta proporción. Los cuerpos, como las personas, se resisten al cambio, y para que cambien el doble de rápido hay que hacer el doble de esfuerzo. Tenemos, entonces, que la fuerza puede medirse en razón de la masa del cuerpo que mueve y de la aceleración que le imprime:

$$Fuerza \propto masa \times aceleración$$

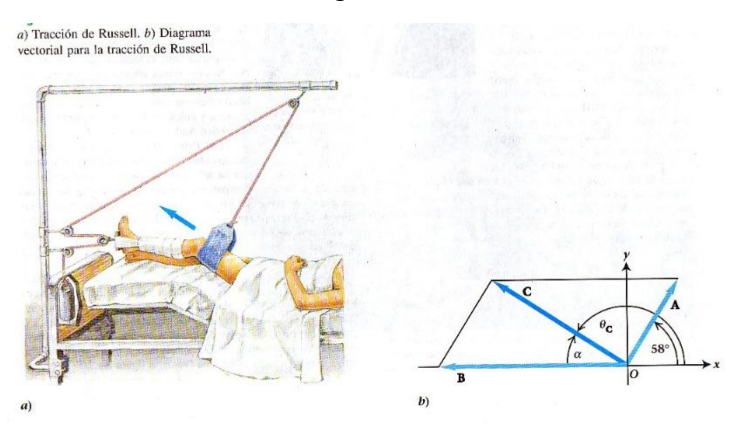
Volvamos a advertir que la relación de proporcionalidad establecida entre fuerza, masa y aceleración no ha sido deducida de principios anteriores, sino inducida de la experiencia. Como tal, sólo podemos sostener su validez para energías y aceleraciones del ámbito de la experiencia en la que se observa. Para variaciones de energía muy pequeñas, como se dan a nivel atómico, o para velocidades muy altas cercanas a la de la luz, es de esperar que no se guarde dicha relación, pues nada de orden físico puede disminuirse o aumentarse al infinito. Para deducir todos estos comportamientos de principios más generales, habría que entender mejor la naturaleza de la corporeidad.

3º La composición de fuerzas

Los efectos de las fuerzas son desplazamientos de los cuerpos donde se aplican, de allí que, cuando se aplican varias fuerzas sobre un mismo cuerpo rígido, se deben componer los diversos desplazamientos en un desplazamiento total. Podemos decir, entonces, que las fuerzas se componen en una fuerza total equivalente a aquella que produciría el desplazamiento total. Ahora bien, vimos que los desplazamientos son magnitudes vectoriales que se suman o

componen según la regla del paralelogramo. Por lo tanto, como las fuerzas tienen la dirección y sentido de los desplazamientos que producen, y una magnitud proporcional, se ve que las mismas fuerzas pueden componerse de manera vectorial. De allí que los físicos modernos consideren a las fuerzas como *magnitudes vectoriales*.

Por supuesto que la aplicación de la matemática vectorial a la realidad natural de las fuerzas implica muchas condiciones que el físico debe tener en cuenta a la hora de resolver un problema. Matemáticamente los vectores se trasladan de forma paralela, pues de otro modo no se pueden sumar. Pero físicamente no es indiferente aplicar una fuerza más adelante o más atrás de un cuerpo rígido, pues la rigidez puede dejar de ser tal. En una mesa ratona con patas de caña se puede apoyar un peso importante, pero si se trata de una mesa de bar de metro y medio de alto, el mismo peso dobla y quiebra las patas.



a) Tracción de Russell. *b)* Diagrama vectorial para la tracción de Russell.

4º ¿Qué es entonces una fuerza? Definición real

La fuerza es el acto o acción que el agente del movimiento local hace sobre el móvil para moverlo o para impedir que otro agente lo mueva. La acción responde a la potencia activa del agente, y ya hemos anunciado que a la potencia activa de los agentes cinéticos la denominamos *energía* (siendo la energía *cinética* la potencia de mover que tiene un cuerpo por el hecho de moverse). Ahora bien, el principio de causalidad exige que haya cierta proporcionalidad entre la potencia activa del agente y el efecto producido, pues nadie da lo que no tiene. Pero no exige que el efecto esté en el agente del mismo modo. De allí que, aunque el movimiento local tiene siempre dirección (es magnitud vectorial), el concepto de energía no implica dirección (no es magnitud vectorial), pues – por ejemplo – el estado de movimiento de un cuerpo, afectado por otras propiedades físicas (como la gravedad), puede ser causa de un movimiento en dirección distinta. Por lo tanto, aunque la fuerza siempre es producida por un agente con cierta energía y depende de la energía – como iremos viendo –, la exigencia de proporcionalidad exigida por la causalidad se da propiamente respecto del efecto final y no tanto respecto de la fuerza aplicada. La magnitud de la fuerza es la intensidad con que el agente se aplica sobre el móvil para inducir el movimiento: a mayor fuerza, la variación del movimiento es más rápida, lo que se vio al comprobar la proporcionalidad entre fuerza y aceleración. En un automóvil, la potencia cinética está en el tanque de combustible a modo de energía química: la fuerza, en cambio, que los pistones comunican a las ruedas, depende de la cantidad de combustible que se quema en cada instante.

Toda fuerza es acción de un motor con cierta energía, aun cuando se aplica no a mover, sino a detener un movimiento. Pero para ver esto en general tenemos que considerar otras especies de agentes cinéticos. Si tenemos a Sócrates sentado en una silla, hay una fuerza de Sócrates hacia abajo que viene de la energía gravitatoria de su cuerpo; y hay una fuerza del banco hacia arriba que lo detiene para que no caiga, que viene de la energía elástica (electromagnética) del banco. Si dejaran de oponerse, Sócrates se movería hacia abajo y el aire hacia arriba por la recuperación elástica del banco. Y en todos estos casos hay acción de una parte sobre otra, implicando al éter a modo de medio elástico (lo que en la física moderna se expresa con la noción de *campo*: campo gravitatorio, eléctrico, magnético).

5º Fuerza y energía

Podemos tener un agente sin efecto, en la medida en que el agente es capaz de obrar pero todavía no obra, siendo agente en potencia de obrar. Pero no podemos tener acción sin efecto, porque la acción es justamente la aplicación del agente a la obra, es agente en acto de obrar. La fuerza, dijimos, es la acción del agente cinético, cuya potencia activa es la energía que posee, y el efecto al que se ordenan los agentes cinéticos es cierto desplazamiento, cierto movimiento local. Por lo tanto, la fuerza está asociada siempre a cierto desplazamiento, como la acción a su efecto.

Advirtamos que esto se manifiesta en el hecho de que la fuerza sea magnitud vectorial. Como dijimos para la velocidad, todas las magnitudes vectoriales están asociadas a un desplazamiento, y no pueden entenderse en un *hic et nunc*, es decir, referidas a un único lugar y un único instante de tiempo: siempre tienen que referirse a un lugar después de otro, que es lo que supone un desplazamiento. Algunos suelen olvidar este aspecto al hablar de

la velocidad instantánea (*nunc*) de un cuerpo y de la fuerza aplicada en un lugar (*hic*). Ni la velocidad es instantánea, sino que termina en un instante o parte de un instante; ni la fuerza es de un lugar, sino que termina su efecto en tal lugar o comienza en dicho lugar.

La fuerza implica desplazamiento, pero no se reduce al simple desplazamiento (no se mide en metros), sino que es la tendencia a un desplazamiento que aumenta la entidad cinética del móvil, es decir, que aumenta la perfección del móvil en cuanto a su movimiento local (de allí que la presencia de una fuerza supone siempre la aplicación de un agente cinético, pues de otro modo no se explica la tendencia a aumentar la entidad o perfección cinética). Porque no todo desplazamiento tiene la misma importancia física, sino que depende del entorno en que se produce:

- En un medio gravitatorio, importa si el desplazamiento es de acercamiento o alejamiento de los cuerpos, y a qué distancia se produce.
- En un medio elástico ocurre algo semejante, pues mientras se va comprimiendo un resorte, el desplazamiento tiene cada vez mayor implicancia física.
- En el espacio vacío, un desplazamiento tiene importancia en la medida en que altera el desplazamiento que un cuerpo se produce a sí mismo por inercia: hacerlo mayor es aumentar la velocidad, con lo que aumenta su energía cinética.

La fuerza, como toda acción, puede considerarse como acción producida por el motor o como pasión sufrida en el móvil. Considerada en el móvil, expresa la importancia física de una dirección de desplazamiento según las condiciones del lugar en que se produce; vista como acción, expresa el compromiso energético del motor respecto del móvil en razón del lugar al que tiende a moverlo.

En la medida en que podamos mensurar la entidad cinética de los diversos estados de un móvil, que no es otra cosa que su energía – porque la misma entidad cinética se hace capacidad de mover, cosa que debemos mostrar mejor –, podemos mensurar también la fuerza. Pues la fuerza equivale, entonces, al aumento de energía del móvil (es decir, aumento de su entidad cinética) en razón de la dirección de desplazamiento en que se aplica el motor[1]:

$$\vec{F} \propto \frac{\overrightarrow{\partial E}}{\partial x}$$

II. La noción de trabajo

1º El «trabajo» de un agente cinético

La fuerza, vista desde el agente, es la intensidad con que se compromete a obrar en cierta dirección, pero la obra total del agente cinético sobre el móvil consiste en el desplazamiento efectivo que le imprimió, habida cuenta de la fuerza con que en cada parte fue obrando:

- Si se levanta una piedra, poniendo distancia entre ella y la tierra, para lo que hay que aplicar una fuerza equivalente al peso de la piedra, la obra total es la altura final que se le dio a la piedra.
- Si se comprime un resorte, haciendo una fuerza cada vez mayor mientras más comprimido, la obra total es la distancia efectiva que se lo comprimió.
- Si se empuja un cuerpo en el espacio, la obra total es la distancia a lo largo de la cual se lo empujó, haciendo aumentar su velocidad.

Como dijimos, lo que importa en todos estos casos no es la simple distancia desplazada, sino lo que esta distancia implica desde el punto de vista de la entidad cinética del móvil: una piedra elevada se ha vuelto capaz de caer y hacer un buen destrozo; un resorte comprimido se ha vuelto capaz de mover una maquinaria; un cuerpo empujado ha acumulado el empuje en mayor velocidad, pudiendo voltear una muralla. Y esta nueva perfección cinética le ha sido dada al móvil por la obra total del motor.

Como la fuerza aplicada por el motor expresa justamente dicho aumento de entidad cinética en razón del desplazamiento, la obra total del motor estará dada por la fuerza aplicada a lo largo de la distancia recorrida. Si nos mantenemos bajo las condiciones en que pueda mensurarse la fuerza y la energía, y teniendo en cuenta que la fuerza aplicada puede ser distinta para cada desplazamiento, la obra total del motor sobre el móvil, que los físicos denominan apropiadamente «trabajo», será la sumatoria de los productos de la fuerza por la porción de desplazamiento en que dicha fuerza pueda considerarse constante: $T \propto \int F_x \partial x$

---

[1] Así entendida, la fuerza es una noción que guarda cierta semejanza con la velocidad. Así como la velocidad expresa el aumento de desplazamiento en razón del tiempo: $\vec{v} \propto \frac{\overrightarrow{\partial x}}{\partial t}$ así la fuerza expresa el aumento de energía en razón del desplazamiento.

Para un resorte la fuerza no es constante, pues hay que hacer una fuerza cada vez mayor para comprimirlo cada vez más, pero en los casos en que la fuerza es constante a lo largo de un desplazamiento, como cuando se sube un cuerpo a cierta altura, o cuando se empuja un cuerpo a lo largo de cierta distancia, el trabajo realizado es proporcional producto de la fuerza por la distancia total.

Como la fuerza expresa el aumento de energía en razón del desplazamiento, según vimos en el punto anterior, se hace evidente que el trabajo realizado por un motor equivale a la energía transmitida al móvil:

$$T \propto \int F_x \partial x = \int \frac{\overrightarrow{\partial E}}{\partial x} \partial x = E$$

2º Trabajo y energía cinética

Estos análisis nos permiten entender por qué la aplicación de una fuerza causa una aceleración constante en un cuerpo y por qué la energía cinética de un cuerpo en movimiento inercial depende del cuadrado de la velocidad.

La aplicación de una fuerza sobre un cuerpo tiende a provocar un desplazamiento, mayor o menor según la intensidad de la fuerza. Si a un móvil se le aplica una fuerza a ritmo constante en una situación en que no acumula energía cinética, por ejemplo al subir un carro por una pendiente, en la que es constantemente frenado por la acción de la gravedad, en cada segundo se le suma cierto desplazamiento, creciendo en altura, y por cada segundo se realiza cierto trabajo: $T \propto F\Delta x$ La energía total invertida depende del camino total recorrido y se acumula – como veremos mejor – en forma de energía gravitacional, pues el vehículo puede bajar la pendiente por su propio peso, alcanzando cierta velocidad, lo que supone energía cinética.

Ahora supongamos que aplicamos la misma fuerza, al mismo ritmo, empujando el carro en el plano, pero teniendo los ejes tan desgastados que es constantemente frenado por la fricción. Ahora el trabajo realizado, proporcional a la fuerza por la distancia, se invierte en energía calórica de los hierros que frotan.

Supongamos finalmente que empujamos con la misma fuerza a un carro bien aceitado que no tiene fricción. Observábamos que una fuerza constante aplicada sobre un cuerpo con movimiento inercial provoca una aceleración constante. Ahora podemos explicarnos esto un poco más, porque la aplicación de una fuerza supone un desplazamiento suplementario al que se tendría por disposición natural. Se entiende que la fuerza aplicada al carro le sume, como en los demás casos considerados, un cierto ritmo de desplazamiento, por ejemplo un metro cada segundo. Pero ahora el carro no acumula esta inyección de energía en energía gravitatoria ni calórica, sino en energía cinética, la que se conserva en velocidad. Por lo tanto, la fuerza aplicada le va sumando siempre un metro más a lo que el móvil recorre por propio movimiento inercial: en el primer segundo adquiere velocidad, por ejemplo 1 m/sg; al siguiente segundo recorrería 1 metro por inercia, pero la fuerza le agrega un metro más, por lo que entonces va a 2 m/sg; al tercer segundo se le agrega otro metro a lo que recorre por inercia y alcanza 3 m/sg; y así siguiendo. La fuerza aplicada de manera constante supone, entonces, cierta velocidad de desplazamiento *energizante* (pues dijimos que la fuerza supone desplazamiento con aumento de entidad cinética), que puede acumularse como energía gravitatoria, calórica, etc., pero que en el caso del movimiento inercial se acumula como energía cinética, esto es, en velocidad, y por lo tanto se resuelve en un crecimiento constante de velocidad, es decir, en una aceleración constante.

La aplicación de una fuerza constante en el tiempo produce una aceleración constante, pero no es constante el esfuerzo o trabajo realizado, esto es, la energía que en cada instante se emplea en mover al cuerpo, lo que ahora podemos ver fácilmente. Se hace evidente que el ritmo de aumento de energía es proporcional a la velocidad, porque la energía comunicada al móvil es igual al trabajo hecho sobre el móvil, y el trabajo es igual a la fuerza aplicada por el desplazamiento recorrido en cada instante: $\partial E = \partial T \propto F\partial x$ Pero para un cuerpo en movimiento, el desplazamiento de cada momento crece con la velocidad; por lo tanto, crece también la energía: $\partial E \propto Fv\partial t$ Si ahora tenemos en cuenta que a mayor fuerza mayor aceleración, que no es otra cosa que el aumento de la velocidad en el tiempo: $F \propto a = \frac{\partial v}{\partial t}$ concluimos que el aumento de energía depende doblemente de la velocidad:

$$\partial E \propto v\partial v$$

Si sumamos la energía acumulada desde una velocidad inicial nula, el análisis matemático nos dice que:

$$E \propto \int_0^v v\partial v = \frac{v^2}{2}$$

El resultado vale para cualquier manera de variación de la velocidad respecto del tiempo, es decir, vale aunque la aceleración no sea constante. Para el caso de aceleración constante no hace falta análisis matemático

para resolver la ecuación, porque es igual al aumento total de la velocidad (que es la velocidad final, pues la inicial es nula) por la velocidad promedio: $E \propto \frac{v}{2} v$

Estos dos resultados: que la aplicación de una fuerza causa una aceleración constante, y que la energía (invertida por el motor y adquirida por el móvil) depende del cuadrado de la velocidad, pertenecen a nuestra experiencia habitual. Mientras se empuja un vehículo, aumenta su velocidad: a la sensación de empuje se sigue la observación de la aceleración. Y empujar un vehículo se hace cada vez más trabajoso mientras más rápido va: como dijimos, hacen falta motores muy poderosos para sostener la misma aceleración a gran velocidad.

Como la fuerza tiene que ver con la transmisión de energía, y en muchos casos una fuerza constante supone una inyección de energía constante, como el del carro en subida o el carro oxidado, puede caerse en la ilusión de creer que una fuerza constante siempre supone un ritmo de energización constante. Pero ya sabemos que no es así, pues mantener aplicada una misma fuerza a velocidades más grandes supone un gasto de energía más importante. La noción de trabajo nos ayudó a explicarlo, pues a velocidades más grandes la fuerza debe aplicarse en cada instante a desplazamientos más largos: los hombres que empujan y los tanques de combustible se agotan cada vez más rápido.

Hay casos especiales, sin embargo, que parecen contradecir este análisis. Cuando un cuerpo cae por fuerza de gravedad, sufre una aceleración importante que se mantiene constante sin que nadie parezca esforzarse ni cansarse más. ¿Dónde está el motor de este movimiento? Deberemos investigarlo. Y los sistema de impulsión por eyección de gases en los cohetes espaciales parecen también burlarse de nuestros principios, pues la fuerza con que empujan depende de la masa de gas expulsado y de la velocidad de expulsión relativa al mismo cohete, de manera que gastan siempre el mismo combustible para empujar con la misma fuerza, independientemente de la velocidad absoluta del cohete. ¿Qué ocurre en este caso? Es interesante analizarlo, por ahora sólo señalemos que se aceleran cuerpos para ambos lados, como en toda explosión, y hay que tener en cuenta la energía total de todas las partes desplazadas. Siempre podremos mostrar la validez de los principios señalados.

C. Ecuaciones dinámicas del movimiento inercial

I. La ecuación fundamental de la dinámica

1º En síntesis

En la observación de los cuerpos hemos distinguido dos accidentes fundamentales: *cantidad* y *masa*. La cantidad se da universalmente en todo cuerpo, pero la masa no sabemos, pues se distribuye de manera no homogénea en el espacio, habiendo partes con mayor o menor densidad de masa, y partes sin masa, a las que llamamos espacio vacío. ¿El espacio vacío es una substancia separada de los cuerpos con masa o una extensión de los mismos? Los físicos modernos tienden a pensar que lo que no tiene masa no es nada, pero es contradictorio pensar que la nada tenga cantidad y ocupe lugar: el espacio vacío es parte corporal con propiedades perfectamente observables.

Para la descripción cinemática del movimiento de los cuerpos habíamos definido qué es el lugar, el desplazamiento o cambio de lugar, la velocidad y la aceleración. Estos tres últimos parámetros: *desplazamiento*, *velocidad* y *aceleración*, pueden ser expresados como magnitudes vectoriales, pues tienen dirección. En el análisis dinámico o causal del movimiento puramente inercial, primero que investigamos porque puede considerarse como primer movimiento, hemos determinado tres nuevos parámetros, la *energía*, la *fuerza* y el *trabajo*:

- La *energía* es la potencia activa de un cuerpo en orden al movimiento local, que se funda en lo que llamamos *entidad cinética* de un cuerpo, que es cierta perfección y acto de un cuerpo (acto primero o entitativo pero accidental, del género de la cualidad pasible) por el que está en tensión a su lugar natural, que hace al cuerpo capaz de moverse o mover a otro. Ya sospechamos que hay muchas maneras de energía, pero por ahora nos interesa en especial la *energía cinética*, que es la capacidad de mover que adquiere un móvil en su relación al medio por haber sido movido. Los físicos modernos tienden a confundir la energía cinética con su efecto, que es el movimiento propio, porque no tienen en cuenta la relación con el medio, que es el espacio vacío, al que consideran pura nada.
- La *fuerza* es la acción (acto segundo) por la que un cuerpo con energía se aplica a mover localmente a otro cuerpo, por lo que la fuerza siempre supone el compromiso energético por parte del cuerpo motor (pues toda acción proviene de una potencia activa) y una tendencia al desplazamiento ordenado al crecimiento de la entidad cinética del móvil (pues toda acción supone su efecto). Si el motor hace

fuerza, es justamente porque el móvil se resiste al cambio de su entidad cinética. Como la fuerza implica desplazamiento, lo que supone dirección, puede mensurarse al modo de magnitud vectorial.

- El *trabajo* es el efecto de la acción del motor sobre el móvil, que resulta de cierto producto[1] de la fuerza (que representa la intensidad con que el motor vence al móvil en cada tramo de su desplazamiento) por el desplazamiento realizado. Aunque el trabajo mira al efecto en cuanto producido por el motor, pues se mide por la fuerza y el desplazamiento, equivale al aumento de entidad cinética en el móvil, la que a su vez se traduce en capacidad de mover a otro, es decir, en cierto tipo de energía.

La observación que nos llevó a considerar el movimiento inercial como primero movimiento fue que los cuerpos en el espacio tienden a conservar su estado de movimiento. Este es un hecho de experiencia que exige explicación causal, pues nada puede moverse a sí mismo como un todo: hay que investigarlo más.

Otra observación empírica es que la fuerza aplicada a un cuerpo es directamente proporcional a la masa y a la aceleración, es decir, que para mover del mismo modo a un cuerpo de doble masa hace falta doble fuerza y, a igualdad de masa, doble fuerza causa doble aceleración. Esta relación vale dentro de lo que se observa, pero debemos suponer (y la física lo confirma) que no vale para velocidades muy grandes o muy pequeñas, pues – como dijimos – las realidades físicas tienen mínimo y máximo.

Las ecuaciones dinámicas del movimiento inercial se basan en esta última proporción. Valen, entonces, dentro de lo que vale dicha relación. Ahora bien, para pasar de simples relaciones de proporción, tales como hasta ahora hemos ido planteando, a igualdades matemáticas, hay que cuantificar adecuadamente cada uno de estos parámetros. Y como esto se puede hacer de varias maneras, consideremos en primer lugar los diferentes sistemas de medida para masa, fuerza y energía.

2º Sistemas de medidas: pasando de la proporción a la igualdad

Hasta ahora, en cinemática, habíamos manejado nociones perfectamente cuantificables, pues el movimiento local se funda en la cantidad, que tiene como propio ser mensurable, y el tiempo es número del movimiento local. Pero ahora no tenemos que lidiar con cantidades sino con cualidades, como la masa y la energía, y con acciones, como la fuerza. Pero, por parte *general*, todas las propiedades que las cosas naturales tienen en cuanto son cuerpos, son muy dependientes de la cantidad, que es el primer accidente corporal; y en *especial*, las propiedades que ahora tenemos en cuenta están todas consideradas en orden al movimiento local, propiamente cuantificable. De allí que no nos será difícil hallar una manera de cuantificar dichas propiedades: se mensuran por sus relaciones necesarias con aspectos cuantitativos.

El efecto más manifiesto y más inmediatamente mensurable de los cuerpos en relación con su masa es el peso gravitatorio. Es fácil hacer una balanza y comparar las masas de diferentes cuerpos según su peso. Se está suponiendo, por supuesto, que el peso es proporcional a la masa de un cuerpo, pero esta suposición es corroborada por muchos otros fenómenos. Por ejemplo, las mismas proporciones que se dan respecto al peso gravitatorio se dan también respecto a los fenómenos de inercia.

Por convenio internacional[2], se ha definido el kilogramo como el peso o masa de un decímetro cúbico de agua (un litro). Tiene la conveniencia de relacionar los pesos y masas con la unidad de distancia: el metro, por medio de la sustancia más común en la tierra: el agua. Aunque como la densidad de un líquido es más variable que la de un sólido, se ha terminado definiendo el kilogramo como la masa y el peso equivalente de un cilindro prototipo de iridio-platino que se guarda en la *Oficina Internacional de Pesos y Medidas*, en París[3].

---

[1] Aquí usamos el término en su significado anterior al de producto matemático. *Produco*, en latín, significa llevar hacia adelante, y *productio* es la prolongación de una acción en el tiempo o en el espacio, por la que se *produce* algo, como la acción del carpintero prolongada en el tiempo y en las diferentes partes de la madera produce la silla. Aquí se trata de la fuerza, que es la acción del motor en razón del movimiento, que debe producirse o ser llevada a lo largo del desplazamiento total. El producto matemático tiene la misma idea, pues 3 por 4 es al número tres llevado o aplicado cuatro veces. Luego veremos que, al mensurar la fuerza con algún sistema de unidades, el concepto de producto se transformará en producto propiamente matemático. Pero es importante guardar los conceptos físicos, sin transformarlos en conceptos puramente cuantitativos.

[2] Enciclopedia Encarta, artículo *Sistema Internacional de Unidades*: "*Sistema Internacional de unidades*, nombre adoptado por la XI Conferencia General de Pesas y Medidas (celebrada en París en 1960) para un sistema universal, unificado y coherente de unidades de medida, basado en el sistema mks (metro-kilogramo-segundo). Este sistema se conoce como SI, iniciales de *Sistema Internacional*".

[3] Enciclopedia Encarta, artículo *Sistema Internacional de Unidades*: "Cuando se creó el sistema métrico decimal el kilogramo se definió como la masa de 1 decímetro cúbico de agua pura a la temperatura en que alcanza su máxima densidad (4,0 °C). Se fabricó un cilindro de platino que tuviera la misma masa que dicho volumen de agua en las condiciones especificadas. Después se descubrió que no podía conseguirse una cantidad de agua tan pura ni tan estable como se requería. Por eso el patrón primario de masa pasó a ser el cilindro de platino, que en 1889 fue sustituido por un cilindro de platino-iridio de masa similar. En el SI el kilogramo se sigue definiendo como la masa del cilindro de platino-iridio conservado en París".

Ahora bien, el peso de un cuerpo es la fuerza vertical que hace en razón de la gravedad. Por lo tanto, el kilogramo puede ser unidad de masa y unidad de fuerza, lo que ya sabemos que no es lo mismo: la masa es magnitud escalar y la fuerza magnitud vectorial. En la medida en que el kilogramo se usa como unidad de masa, se abrevia kg; cuando se usa como unidad de fuerza se agrega su condición vectorial: $\overrightarrow{kg}$

Pero si quisiéramos quedarnos con el kilogramo como unidad de masa y fuerza, surge un problema práctico. Porque – como pasaremos a ver – la proporción fundamental de la dinámica del movimiento inercial es la que se da entre la fuerza, la masa y la aceleración, de la que tratamos más arriba: $f \propto m.a$ Ahora bien, para plantear esta proporción como una ecuación de igualdad, tenemos que prestar atención a las unidades que usamos para cada variable. Sabemos, por el origen mismo de las unidades, que una fuerza de un kilogramo (fuerza) aplicada sobre una masa de un kilogramo (masa) le imprime una aceleración igual a la de la gravedad: $g = 9.8\frac{m}{sg^2}$ La proporción nos dice que a doble fuerza, doble aceleración: $2g$ Por lo tanto, para pasar válidamente de la proporción a la igualdad, si medimos la fuerza y la masa en kilogramos y la aceleración en metros sobre segundos al cuadrado, habría que poner como factor de igualación el valor numérico de g: $f = 9.8\, m.a$ lo que es un incordio. De allí que los físicos, para simplificar esta ecuación fundamental, hayan tenido que elegir entre considerar al kilogramo como unidad de masa o de fuerza, y en uno u otro caso, definir la otra unidad de manera que no haya que poner ningún factor numérico en dicha igualdad. De aquí se siguen dos sistemas de unidades:

- El *Sistema Internacional* (SI), adoptado por la Conferencia General de Pesos y Medidas de París, toma el kilogramo como unidad de masa, y define como unidad de fuerza al *Newton* (N), que corresponde a una fuerza que, sobre una masa de 1kg, imprime una aceleración de $1\frac{m}{sg^2}$ Aplicando la ecuación, se dirá también que $1N = 1\frac{kg\, m}{sg^2}$
- El *Sistema Técnico español* (ST) toma el kilogramo como unidad de fuerza, y define una *unidad técnica de masa* (utm), equivalente a la masa que, bajo una fuerza de 1 kg, se acelera a $1\frac{m}{sg^2}$ Aplicando la ecuación, tenemos que $1utm = 1\frac{\overrightarrow{kg}\, sg^2}{m}$

Ha predominado el *Sistema Internacional*, y con cierta razón, porque la masa es una propiedad más fundamental de los cuerpos que la fuerza. Pero en ambos casos tenemos el problema de abandonar una unidad más ligada a nuestra experiencia cotidiana, pues estamos acostumbrados a referirnos a kilogramos tanto para masa como para fuerza. Un Newton es una fuerza casi diez veces menor que un kilogramo fuerza (1/9.8 kg), y un *utm* es una masa casi diez veces mayor que un kilogramo masa (9.8 kg). Nosotros seguiremos también el Sistema Internacional.

Advirtamos aquí otro problema mayor. Los aprendices de la física-matemática moderna se acostumbran a definir las realidades físicas no por lo que son en sí, sino por las ecuaciones en que quedan involucradas. Al plantear que $f = ma$ parece que se dice que la fuerza es una masa acelerada, y también parece que se trata de puras cantidades, todo lo cual es muy ajeno a la realidad física que esa ecuación significa. La fuerza es acción, la masa cualidad, la aceleración es cantidad pero en relación al tiempo. Y la igualdad planteada por la ecuación significa cierta proporción entre aspectos muy distintos del fenómeno inercial. Por eso cuando se dice que $1N = 1\frac{kg\, m}{sg^2}$ hay que entender que lo que se está significando es que 1 Newton es una fuerza que, sobre un cuerpo de 1 kg de masa, imprime una aceleración de 1 m/sg^2. No hay que quedarse en los números, sino tener siempre presente la realidad física a la que se refieren.

3º La ecuación fundamental

La ecuación fundamental de la dinámica es – como acabamos de decir – la que relaciona la fuerza con la masa y la aceleración de un cuerpo: $\vec{f} = m\vec{a}$ donde ahora notamos el carácter de magnitud vectorial que tienen la fuerza y la aceleración. Una fuerza aplicada a un cuerpo en

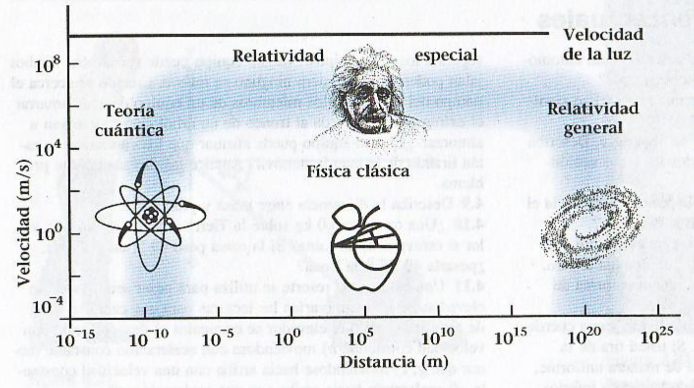


Diagrama de velocidad-distancia que ilustra el intervalo de aplicabilidad de la mecánica newtoniana. (Note que las escalas que se eligieron no son lineales, sino logarítmicas.) Las leyes de la física clásica (área central) son consistentes con las observaciones de la vida cotidiana. Sin embargo, cuando tratamos con distancias muy pequeñas o muy grandes o con velocidades muy altas, estas leyes no describen adecuadamente lo que observamos. En esas regiones, para describir y predecir las observaciones físicas, necesitamos las leyes de la mecánica cuántica y la relatividad en lugar de las leyes de Newton.

movimiento inercial provoca una aceleración proporcional a su magnitud y de la misma dirección. Y cuando observemos que un cuerpo sufre una aceleración, debemos investigar qué le aplica la fuerza que explica dicha aceleración.

Hemos advertido que se trata de una ecuación que puede tener márgenes de validez, por ahora desconocidos para nosotros. ¿Qué ocurre a velocidades muy altas o para masas muy pequeñas? Se verá que esta ecuación conserva una mayor generalidad si se la define respecto del momento, como hicimos al principio: $f = \frac{\partial(mv)}{\partial t}$ Como en los casos de observación común la masa no varía en el tiempo, nos queda $f = m\frac{\partial v}{\partial t} = ma$

4º Aplicaciones prácticas



Airbus 310
El Airbus A310, que Airbus Industries empezó a comercializar en 1978, lo utilizan ahora compañías aéreas de todo el mundo. Es un aparato de medio o largo alcance proyectado para recorrer distancias mayores con menos pasajeros que el anterior, A300, del que se diferencia por el diseño de las alas y la cabina y por el aumento de potencia, capacidad y autonomía.

La ecuación de la dinámica puede aplicarse en muy diversos casos. Consideremos algunos.

Movimientos rectilíneos. Un avión birreactor Airbus A320 de 82 toneladas acelera hasta la velocidad de despegue de 270 km/h en 27.1 sg. ¿Qué fuerza hace cada uno de los reactores y qué distancia recorre por la pista antes de elevarse? La aceleración puede suponerse constante, y como conviene calcularse en m/sg², pasamos la velocidad de km/h a m/sg dividiendo por 3.6. Como la velocidad inicial es nula, tenemos:

$$a = \frac{v_f - v_0}{\Delta t} = \frac{75}{27.1}\frac{m}{sg^2} = 2.77\frac{m}{sg^2}$$

Como son dos reactores, cada uno hace la mitad de la fuerza total que mueve al avión:

$$f = \frac{ma}{2} = \frac{82000 \times 2.77}{2}N = 113.6\,kN$$

Una fuerza de 113.600 N equivale a 11.590 kg fuerza. Es decir que cada reactor hace una fuerza capaz de levantar un poco más de 11 toneladas y media. No es poca cosa.

En cuanto a la distancia recorrida, la podemos calcular fácilmente con la velocidad promedio y el tiempo empleado: $e = \frac{v}{2}t = \frac{75\times 27.1}{2}m = 1.016\,m$ La pista, entonces, tiene que tener más de 1 km. Hay aviones que necesitan hasta 4 km de pista.

Movimientos rotatorios. ¿A qué velocidad puede haber impactado la piedra con que David mató a Goliat? La honda de los antiguos consistía en una cinta de cuero doblada, con la piedra envuelta en el pliegue y tomada por los extremos, uno de los cuales se soltaba para liberar la piedra después de hacer girar velozmente la honda. Aquí tenemos que analizar un movimiento giratorio. La piedra describe un círculo con centro en el hombro cuyo radio es igual a la longitud del brazo más la honda. En el último tramo antes de ser soltada, la piedra gira a la velocidad de salida con una aceleración centrípeta que se calcula según lo visto más arriba: $a_c = \frac{v^2}{r}$ Ahora bien, si hay una aceleración hacia el centro, es porque tiene que haber una fuerza hacia el centro que la cause, que se calcula según lo dicho: $f = ma$ Podemos hacer una estimación de la velocidad de salida de acuerdo a la masa de la piedra y a la fuerza que puede sostener el brazo de un hombre fuerte. Utilizando las dos fórmulas y despejando la velocidad, tenemos:

$$v = \sqrt{\frac{f.r}{m}}$$

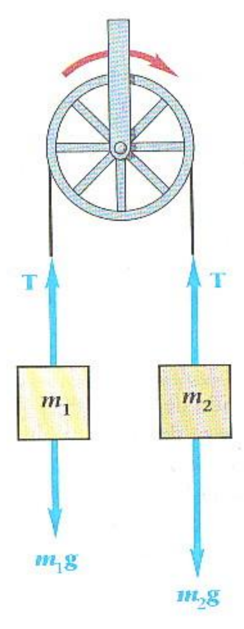


703. — Frondeurs assyriens.
D'après Layard, *Monuments of Nineveh*, t. II, pl. 20.

El brazo de un hombre alto tiene unos 60 cm, y la honda, para que sea maniobrable, no debería tener más de 1m (en la imagen se ven más cortas), por lo que tenemos un radio de 1.60 m. Una piedra redonda de unos 5 cm de diámetro pesa unos 200 gr, y David no tiene que haber elegido algo más grande, pues la armadura de Goliat descubría espacios pequeños. Por supuesto que, en cuanto a la potencia del tiro, el arte está en imprimir la

mayor velocidad con el menor giro, pero sea cual fuere el procedimiento, al momento de soltar, la velocidad está relacionada con la fuerza del brazo según la fórmula dada, y no debemos suponer tensiones superiores a las humanas. Como máximo suponemos que el brazo haga una fuerza de 30 a 50 kg (300 a 500 N). El resultado nos da márgenes de velocidad entre 50 y 65 m/sg, es decir, entre 180 y 230 km/h. Un buen golpe capaz de postrar al más cabezadura.

Movimientos gravitatorios. En una construcción, un albañil ha subido un balde de cemento a un segundo piso por una soga con polea, y un segundo albañil decide subir al balde para que el primero lo baje rápido. Suponiendo que el primero no suelta la soga, ¿a qué velocidad llega el segundo al piso, y a qué velocidad llega el primero cuando el segundo suelta el balde? El ascensor improvisado corresponde a una máquina de Atwood[1]. La situación se ve diagramada en la figura. **T** es la fuerza de tensión en la cuerda, $\mathbf{m_1}$ es la masa del primer albañil y $\mathbf{m_2}$ la masa del segundo albañil más el balde de cemento. El peso de cada parte es el producto de la masa por la aceleración de la gravedad **g**. Supongamos – para acercarnos más a la máquina de Atwood – que ambos albañiles tienen la misma masa **M**, siendo **m** la masa del balde de cemento. Tenemos, entonces, que m_1 = M y m_2 = M+m. Si no se agregara el balde, las fuerzas se equilibrarían y la polea no rodaría. La tensión de la soga sería igual al peso de los dos albañiles tontamente colgados: T = 2 Mg. Si el primer albañil soltara la soga, deja de haber tensión en la soga y el segundo albañil baja en caída libre con la aceleración de la gravedad, sin importar su peso ni el peso del balde (como veremos, sería un merecido porrazo por hacerse el vivo). Estos dos casos extremos nos hacen ver que, cuando las masas son distintas, la tensión en la soga no es igual a la suma de ambos pesos, como quizás podría pensarse, sino menor, y tanto menor cuanto más diferentes las masas. Y que con la aceleración resultante pasa lo inverso: es siempre menor a la de la gravedad, y tanto menor cuanto menos diferentes las masas. Pero pasemos a un cálculo preciso.



Como los dos cuerpos están unidos por la soga, la aceleración **a** con que uno sube es igual a la aceleración con que el otro baja. Y para cada cuerpo, la fuerza resultante entre el peso y la tensión de la soga es igual a la masa por la aceleración:

$$f_1 = T - Mg = Ma$$
$$f_2 = (M + m)g - T = (M + m)a$$

Tenemos dos ecuaciones con dos incógnitas, a y T, y podemos empezar calculando a. Para ello despejamos T en cada ecuación e igualamos:

$$T = M(g + a) = (M + m)(g - a)$$

De esta igualdad se puede despejar a:

$$Mg + Ma = Mg - Ma + mg - ma \rightarrow 2Ma + ma = mg$$
$$a = \frac{m}{2M + m} g$$

Para el caso en que m=0, es decir, las dos masas son iguales, la aceleración resultante es nula; para M=0, es decir, sólo queda **m** en un lado de la polea, la aceleración es igual a **g**. Son los dos casos extremos que habíamos señalado. Pero vayamos ahora a nuestros dos albañiles. Supongamos que cada uno pesa 85 kg, que el balde de cemento pesa 7 kg, y que la altura del segundo piso son 5 m. La aceleración a la que baja el albañil avivado es:

$$a = \frac{m}{2M + m} g = \frac{7}{2 \times 85 + 7} g = 0.0395\, g = 0.388 \frac{m}{sg^2}$$

La velocidad final después de bajar 5 m viene dada por la fórmula vista más arriba (velocidad inicial nula):

[1] Enc. Encarta, *Máquina de Atwood*: "La Máquina de Atwood es un dispositivo mecánico que consiste en dos masas enlazadas por una cuerda ligera a través de una polea. Esta máquina, que tuvo un gran éxito en su época, fue ideada en el siglo XVIII por el físico inglés George Atwood para ilustrar las leyes de la mecánica newtoniana, especialmente la proporcionalidad que existe entre la fuerza resultante aplicada a un cuerpo y la aceleración que le produce. En la actualidad esta máquina sólo tiene un valor histórico y didáctico. Está formada por dos cilindros metálicos unidos por una cuerda ideal (de masa y tensión despreciables) que pasa por la garganta de una polea ideal (de momento de inercia despreciable) que puede girar, sin rozamiento, alrededor de un eje horizontal. Si se coloca una sobrecarga de masa conocida, *m*, sobre uno de los cilindros, éste adquiere un movimiento vertical de caída del que se puede averiguar su aceleración, *a*. Esta aceleración constante y proporcional al peso, *m·g*, de la sobrecarga vale: $a = \frac{m}{2M+m} g$ donde *M* es la masa de cada uno de los cilindros. Esta expresión se puede resolver ya que son conocidos los valores de *M*, *m* y el valor local de *g* (aceleración de la gravedad). Inversamente, si se conocen *M*, *m* y *a* experimentalmente, y se hacen las correspondientes correcciones de los efectos de la resistencia de la cuerda y de la polea, se puede obtener el valor de *g* con bastante exactitud".

$$v = \sqrt{2ae} = \sqrt{2 \times 0.388 \times 5}\frac{m}{sg} = 1.97\frac{m}{sg} = 7.1\frac{km}{h}$$

Es la velocidad que se adquiere al saltar de un escalón:

$$e = \frac{v^2}{2g} = \frac{1.97^2}{2 \times 9.8}m = 0.2m$$

Para calcular el tiempo de caída en función de la altura y aceleración tenemos:

$$t = \sqrt{\frac{2e}{a}} = \sqrt{\frac{2 \times 5}{0.388}}sg = 5.08\,sg$$

Como se ve, la bajada del segundo albañil es suficientemente rápida, 5 sg, y suave, como bajar un escalón. El primer albañil, aferrado a la soga, subió al segundo piso, y cuando el segundo suelta el balde, baja con el único contrapeso del balde. Planteemos lo mismo para esta nueva situación, en la que tenemos a M (la masa del albañil) por un lado y a m (la masa del balde) por otro:

$$f_1 = Mg - T = Ma$$
$$f_2 = T - mg = ma$$
$$T = Mg - Ma = mg + ma$$
$$a = \frac{M - m}{M + m}g = \frac{85 - 7}{85 + 7}g = 0.849\,g = 8.31\frac{m}{sg^2}$$
$$v = \sqrt{2ae} = \sqrt{2 \times 8.31 \times 5}\frac{m}{sg} = 9.12\frac{m}{sg} = 32.8\frac{km}{h}$$

La velocidad a que cae el primer albañil equivale a un salto de algo más que un escalón:

$$e = \frac{v^2}{2g} = \frac{9.12^2}{2 \times 9.8}m = 4.2m$$

Mal le fue al pobre hombre. La tensión de la soga en movimiento es siempre menor a la suma de los dos pesos, menor mientras la aceleración se acerca a la de caída libre (g). Podemos calcular la tensión en la soga para los dos casos. Si consideramos la masa del primer albañil, tenemos para el primer caso: $T = M(g + a) = 866$ N ($88.4\,\overrightarrow{kg}$) Y para el segundo caso: $\mathrm{T} = \mathrm{M}(\mathrm{g} - \mathrm{a}) = 126.65$ N ($12.9\,\overrightarrow{kg}$)

II. Expresiones derivadas de la ecuación de la dinámica

1º La ecuación de la dinámica referida a la energía

Con un ajuste de unidades podemos transformar la proporción entre fuerza y energía en ecuación:

$$\vec{F} = \overrightarrow{\frac{\partial E}{\partial x}}$$

La fuerza mayor o menor indica el mayor o menor aumento de energía en función del desplazamiento. Como el desplazamiento tiene dirección (es magnitud vectorial), también lo tiene la fuerza. Esta ecuación puede considerarse como una definición de la fuerza en función de la energía, al modo como la ecuación $\vec{v} = \frac{\partial \vec{x}}{\partial t}$ puede considerarse una definición de la velocidad en función del desplazamiento, por lo que no supone, como para el caso anterior de la relación de la fuerza con la masa y aceleración, una ecuación cuya validez deba comprobarse por la experiencia, sino una equivalencia necesariamente válida, válida *por definición*. De allí que, aunque el concepto de energía es fundamental en nuestro asunto, no digamos que ésta sea la *ecuación fundamental*, como lo dijimos para la anterior.

Se nos podría objetar que se define lo oscuro por lo claro y no lo claro por lo oscuro. Que para el caso de la velocidad, ciertamente es más claro el desplazamiento, pero que para el caso de la fuerza, es más claro el concepto de fuerza que el concepto de energía: cualquiera sabe qué es fuerza, pero ni los físicos saben qué es la energía. Pero no estamos de acuerdo: *la fuerza tiene mayor evidencia sensible*, *pero la energía tiene mayor evidencia intelectual*. El sentido del tacto es un buen dinamómetro[1] que mide la fuerza por la presión sobre la piel, de allí que todos sepan

[1] Enc. Encarta, *Dinamómetro*: "Cualquiera de los diferentes instrumentos de laboratorio empleados para medir la fuerza. Una forma común de dinamómetro es una balanza de resorte calibrada en newtons, la unidad de fuerza del Sistema Internacional de unidades (SI). La palabra «dinamómetro» también se emplea para designar instrumentos que miden la potencia (trabajo realizado por unidad de tiempo) de un motor, por ejemplo en la industria automovilística".

a qué sensación corresponde el concepto de fuerza. Pero otra cosa es decir *quid est* la fuerza. La fuerza es acción, y el concepto de acción es siempre de difícil comprensión, pues implica una realidad imperfecta a modo de medio entre la potencia activa del agente o motor y el efecto final del paciente o móvil. En asuntos de movimiento local, esto es, asuntos *cinéticos*, el concepto físico fundamental es el de energía, que significa a la vez la potencia activa del motor y la entidad cinética adquirida (efecto) del móvil. Si los físicos no saben decir *qué es* la energía, es porque tienen mal método científico, que se no se preocupa en definir la esencia o quididad de las cosas. Sin embargo, en sus cabezas científicas tienen siempre más claro los estados de energía inicial y final de los procesos, que las fuerzas que se hayan aplicado en el transcurso de los mismos. Y cualquiera sabe que para hacer algo en el orden cinético se necesita energía, y que en lo que queda hecho se invirtió energía. Mientras que el proceso de las fuerzas es siempre más misterioso, pues a veces trabajan y otras se equilibran y están estáticas.

Volvamos a nuestra ecuación. Para que guarde la forma simple que le hemos dado, hay que definir un sistema coherente de unidades. Si la unidad de fuerza es el *newton*, hay que definir una unidad de energía que corresponda al trabajo de una fuerza de 1 N a lo largo de 1 m. A esta unidad de energía se la ha llamado *joule* o *julio* (J), en honor al físico británico James Prescott Joule. Si la fuerza se mide en kilogramo ($\overrightarrow{kg}$), la unidad de energía se denomina directamente *kilográmetro* (kgm). Este tipo de denominaciones es inconveniente, porque lleva a referir siempre el concepto de energía al proceso por el que se aplica (fuerza por distancia), siendo la energía algo anterior y más amplio. ¿Qué sentido tiene decir que un asteroide tiene una energía cinética de x kilográmetros? Puede entenderse como el trabajo que tendría que hacer una fuerza para detenerlo, pero – como se ve – es manera muy indirecta de denominarlo. En cambio, sería más comprensivo denominar la fuerza en razón de la unidad de energía, llamando – por ejemplo – al newton *julímetro* (!), esto es, julio/metro, lo que significa que la fuerza, que siempre implica desplazamiento, es tal que produce un aumento de 1 julio a lo largo de 1 metro.

James Prescott Joule
El físico británico James Prescott Joule centró sus investigaciones en los campos de la electricidad y la termodinámica. Demostró que el calor es una transferencia de energía y determinó el equivalente mecánico del calor.
Enciclopedia Encarta
Science Photo Library/Photo Researchers, Inc.



Si dejamos de lado la fuerza y referimos la energía a la masa y aceleración, según dicta la ecuación fundamental, tenemos:

$$\frac{\overrightarrow{\partial E}}{\partial x} = ma$$

La energía total invertida y adquirida en la aceleración de un móvil desde el estado de reposo (velocidad cero) hasta cierta velocidad final, a lo que llamamos energía cinética del móvil, viene dada por la integración de los aumentos de energía dados en razón de cada desplazamiento:

$$E = \int_0^v ma\partial x = \int_0^v m\frac{\partial v}{\partial t}\partial x = \int_0^v mv\partial v = \tfrac{1}{2}mv^2$$

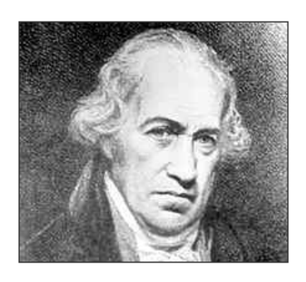
Como puede verse, este resultado es independiente de la manera como el móvil ha sido acelerado, si con aceleración constante o no. La solución supone que la masa no varía con la velocidad. Esta ecuación expresa otro estado de la ecuación fundamental de la dinámica, en cierto aspecto aun más importante. Porque la ecuación en que interviene la fuerza, se refiere al proceso de aceleración *in fieri*, mientras se está produciendo, donde no se tiene en cuenta la velocidad absoluta sino su variación en el tiempo, esto es, la aceleración, mientras que la ecuación de la energía se refiere al proceso terminado, *in factum esse*, donde sólo se tiene en cuenta la velocidad final.

2º Potencia y la ecuación de la dinámica

Un parámetro útil para muchos casos, que no considera la energía en el estado final, sino en el proceso del movimiento, es la variación de la energía en razón del tiempo: $\frac{\partial E}{\partial t}$ a lo que los físicos llaman *potencia*. Si establecemos una unidad de potencia conveniente, podemos definir la potencia por la siguiente igualdad:

$$P = \frac{\partial E}{\partial t}$$

James Watt
James Watt aportó grandes mejoras a la máquina de vapor, e hizo posible su uso práctico en la industria. En 1764 se le encargó la reparación de una máquina de vapor de Newcomen. Mientras la arreglaba, Watt se dio cuenta de que la máquina desperdiciaba energía e introdujo una serie de modificaciones, entre ellas una cámara separada para enfriar el vapor, que aumentaba mucho la eficiencia.



En el Sistema Internacional, a la unidad de potencia equivalente al aumento de 1 joule en 1 sg se la denomina watt, en honor al ingeniero escocés James Watt. En el Sistema Técnico español es directamente el kgm/sg, la energía que produce el trabajo de una fuerza de 1 $\overrightarrow{kg}$ que se aplica a una velocidad de 1 m/sg.

El mismo J. Watt, en sus intentos de medir la potencia de las máquinas de vapor para mejorar su rendimiento, determinó el trabajo promedio que un caballo podía hacer en un tiempo determinado, encontrando que podía sostener una fuerza equivalente al peso de 550 libras a una velocidad de 1 pie/segundo, unidad que se ha llamado *caballo de vapor* (*hp*: horse-power). Como la libra equivale a 0.4536 kg y el pie a 0.3048 m, tenemos las siguientes equivalencias:

$$1\ hp = 550\,\frac{libras \times pie}{sg} = 550\,\frac{0.454\ kg \times 0.305\ m}{sg} = 76.1\,\frac{kgm}{sg} = 746\ w\ (\frac{Nm}{sg})$$

Un motor de un caballo tiene una potencia de 746 w, más o menos lo que consume una plancha.

Como el aumento de energía viene dado por el trabajo de una fuerza: $\partial E = f \partial x$ si tenemos en cuenta la ecuación de la dinámica obtenemos:

$$P = \frac{\partial E}{\partial t} = f\,\frac{\partial x}{\partial t} = mva$$

Vemos, como ya lo habíamos comprobado, que la potencia – por ejemplo – que invierte un motor en acelerar un vehículo no sólo es proporcional a la masa y a la aceleración, sino también a la velocidad absoluta, lo que significa que para mantener la misma aceleración a mayor velocidad, tiene que aplicar mayor potencia el motor.

Tabla 6.3 *Producción y consumo de potencia aproximados*

Dispositivo	Potencia aproximada (en W)
Presa Hoover	1.92×10^9
Avión jumbo jet	1.3×10^8
Uso de energía química de un automóvil a 60 mph	1.1×10^5
Estufa eléctrica	1.2×10^4
Secadora de ropa	5.6×10^3
Consumo eléctrico promedio *per cápita* (Estados Unidos)	1.5×10^3
Potencia solar disponible por metro cuadrado (promedio en Estados Unidos durante las 24 horas del día)	180
TV a color de estado sólido	120
Lámpara de destellos de halógeno de dos baterías	1.5
Calculadora de bolsillo (pantalla de cristal líquido)	7.5×10^{-4}

3º Resumen de las ecuaciones dinámicas del movimiento inercial

Si consideramos el movimiento local desde el punto de vista de la causalidad, la noción fundamental es la de *energía*, pues todo aumento de energía del móvil supone la intervención de un motor, y la exigencia que la causalidad impone al motor es que tenga la energía suficiente para producir dicho cambio. A partir de la noción de energía pueden definirse otras dos nociones, la *potencia* y la *fuerza*. La potencia es la variación de la energía en razón del tiempo y la fuerza es la variación de la energía en razón del desplazamiento. Si distinguimos, entonces, las definiciones, siempre válidas, de las ecuaciones propiamente dichas, que presuponen un cierto margen de validez, tenemos en resumen:

Ecuaciones dinámicas del movimiento inercial			
Definiciones	E	$P = \frac{\partial E}{\partial t}$	$\vec{F} = \frac{\overrightarrow{\partial E}}{\partial x}$
Ecuaciones	$E = \frac{1}{2} mv^2$	$P = mva$	$\vec{F} = m\vec{a}$

III. EL CHOQUE ELÁSTICO

Hasta ahora habíamos planteado problemas prácticos con fuerzas constantes. Un caso interesante de fuerza variable, que nos introducirá en los importantísimos asuntos de las leyes de conservación de la energía y del impulso, es el de un resorte. La compresión y extensión de un resorte cumple – si no es excesiva – con la denominada *ley de Hooke*, según la cual, la fuerza que se debe aplicar al resorte (y por lo tanto la fuerza que el mismo resorte aplica) para comprimirlo o extenderlo es directamente proporcional al desplazamiento de su punto de equilibrio, proporción que viene afectada por una constante k, mayor o menor según la importancia del resorte:

$F = kx$ (en el *Sistema Internacional* k se mide en N/m)

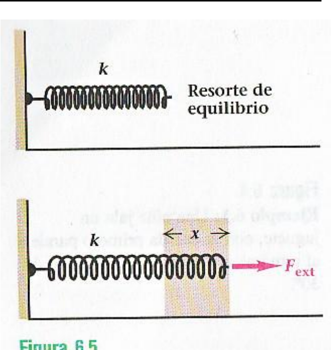


Figura 6.5 Resorte que cumple con la ley de Hooke. F_{ext} es la fuerza aplicada al resorte para producir una extensión x.

El trabajo que debe hacer una fuerza para comprimir o extender un resorte una cierta distancia x será: $T = \int_0^x F(x)\partial x = \int_0^x kx\partial x = \frac{1}{2}kx^2$ Es decir, el trabajo de la fuerza variable es el equivalente a la fuerza promedio $\frac{kx}{2}$ por la distancia total x.

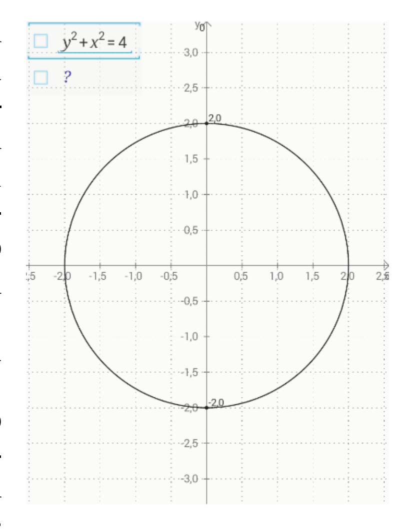
Sabiendo esto, ahora planteemos el siguiente problema. ¿Qué ocurre cuando soltamos un resorte extendido una distancia x_r con una bola de masa m unida a su extremo? Supongamos que el experimento se hace en el vacío, sin gravedad ni fricción, con un resorte de masa despreciable. Pongamos el punto de equilibrio del resorte en x=0. El resorte va a acelerar la masa hacia su punto de equilibrio con una fuerza variable $F = -kx$ (negativa porque es en dirección contraria a x); como al llegar al punto de equilibrio la bola está acelerada, tenderá a comprimir el resorte con una fuerza $F = -ma$ Cuando el resorte comprimido frena totalmente la masa, vuelve a impulsarla a su punto de equilibrio, y en el punto de equilibrio la masa lo extiende volviendo al punto inicial. Y la bola queda oscilando en torno al punto de equilibrio del resorte. ¿Qué velocidad tiene la bola en cada instante?

La fuerza que hace el resorte está constantemente acelerando la bola, por lo que tenemos: $-kx = ma$ (con signo – porque el sentido de la fuerza es siempre contrario al desplazamiento). Como la aceleración es la variación de la velocidad: $a = \frac{\partial v}{\partial t}$ y la velocidad es la variación del desplazamiento: $v = \frac{\partial x}{\partial t}$ tenemos que: $a = v\frac{\partial v}{\partial x}$ Tenemos entonces: $mv\frac{\partial v}{\partial x} = -kx$ Para x=0 la velocidad es máxima pero la aceleración es nula; para la elongación máxima del resorte $x=x_r$ con la que se empezó el movimiento, la aceleración es máxima y la velocidad es nula. Podemos, pues, hallar la velocidad sumando las variaciones a partir de x=xr y v=0, aprovechando la ecuación planteada:

$$\int_0^v mv\partial v = -\int_{x_r}^x kx\partial x$$

Lo que nos da la siguiente relación entre velocidad y desplazamiento[1]:

$$\frac{1}{2}mv^2 = -k\frac{(x_r + x)}{2}(x - x_r)$$
$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}k(x_r^2 - x^2)$$



El resultado es interesante: $\frac{1}{2}mv^2$ es la energía cinética de la bola en cada punto, que resulta ser nula cuando x=xr y máxima cuando x=0. Pero en x=0 la energía cinética es igual al trabajo que se hizo para extender el resorte a su máxima elongación: $\frac{1}{2}kx_r^2$ Y en cada punto intermedio, la energía cinética de la bola es igual a lo que podríamos llamar el trabajo perdido del resorte, es decir, a la diferencia entre el trabajo máximo inicial y el trabajo que implica el desplazamiento intermedio del resorte: $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}kx_r^2 - \frac{1}{2}kx^2$ Evidentemente, el trabajo hecho sobre el resorte se va invirtiendo en energía cinética, y luego la energía cinética se invierte en trabajo sobre el resorte, y así continúa oscilando.

Si la bola pesara 2 kg y el resorte tuviera una constante k tal que hubiera que hacer una fuerza de 2 N para extenderlo 1 m (un resorte muy blando, pues 2 N equivalen a un peso de 200 gr), la relación entre velocidad y desplazamiento del resorte sería: $v^2 + x^2 = x_r^2$ El gráfico de velocidad en relación del desplazamiento sería una perfecta circunferencia de radio x_r. Si le hubiéramos dado una elongación inicial de 2 m, la velocidad máxima en el punto de equilibrio del resorte sería de 2 m/sg.

Pero anunciamos tratar de los choques elásticos. Pues bien, si un cuerpo con un momento mv choca contra un resorte de constante k, primero lo comprime una cierta distancia, que podemos calcular fácilmente de nuestra ecuación: $x = \sqrt{\frac{m}{k}}v$ y luego vuelve a recuperar su mismo momento pero con sentido opuesto. Y cualquiera fuera la ley que siga el medio elástico contra el que choca el cuerpo, si la fuerza de compresión es igual a la de extensión, el cuerpo recupera su energía cinética, aunque cambia la dirección del movimiento.

[1] No tendría que asustarnos el resolver esta integral. El gráfico de kx en función de x es una recta con pendiente k. La integral es el área bajo la recta. En este caso tenemos que tener cuidado, porque vamos de xr hacia atrás (con lo que la superficie nos da negativa). La superficie se calcula como la base, que es $(x-x_r)$ (da negativo para x menor que x_r) por la altura promedio, que es $(kx+kx_r)/2$. Es lo que ponemos en el resultado.

D. Las leyes de conservación

I. Acerca de los ciclos conservativos en general

1º Ciclos materiales e inmateriales

Los hombres siempre admiraron los ciclos que se observan en los cambios de las cosas, ciclos de cambios y permanencia en todos los órdenes: físico, biológico y social. Una cosa cambia y mueva a otra, y esta otra mueve a una tercera, y así se producen series complejas de movimientos que terminan moviendo las primeras a su posición original y todo empieza de nuevo. A la mañana el zapatero le da un billete al panadero por el pan, al mediodía el panadero le da el billete al maestro por las lecciones, y a la tarde el maestro le da el mismo billete al zapatero por los zapatos. Y así todo permanece cambiando y cambia para permanecer: "Pasa una generación y viene otra, pero la tierra es siempre la misma. Sale el sol, se pone el sol y se apresura a llegar al lugar de donde vuelve a nacer. Tira el viento al mediodía, gira al norte, va siempre dando vueltas y retorna a sus giros. Los ríos van todos al mar, y la mar no se llena; al lugar de donde ellos vinieron tornan de nuevo para volver a correr. Todas las cosas trabajan más que cuanto el hombre puede ponderar; no se sacia el ojo de ver ni se harta el oído de oír. Lo que fue, eso será; lo que ya se hizo, eso es lo que se hará; no se hace nada nuevo bajo el sol. Si de algo se dice: «Mira, esto es nuevo», aun eso fue ya en los siglos anteriores a nosotros" (Ecl 1, 4-10).

Ahora bien, es claro que los ciclos sociales dependen de los biológicos, pues la vida del hombre se ordena de acuerdo a los tiempos de siembra y de cosecha, de celos y maternidades; y que los ciclos biológicos dependen de los físicos, de lluvias y sequías, de calores y heladas. Y como también es claro que los cambios físicos dependen primeramente del simple movimiento local de los cuerpos, del sol, de los aires y de las aguas, los sabios prestaron especial atención a la transmisión y conservación de los impulsos cinéticos.

Todos estos ciclos, en todos sus órdenes, están regidos por las leyes de la causalidad. No hay nada nuevo que no venga de lo que ya era, es decir, nada se mueve que no sea movido por otro (nada pasa de la potencia al acto que no sea movido por un agente en acto). Si el panadero adquiere un billete, es porque se lo dio el zapatero, y si el zapatero recupera su billete, es porque se lo dio el maestro. Y si un ciclo de movimientos vuelve a su comienzo, es porque conserva cierta perfección, sin que nadie de fuera la acreciente y sin que nadie de dentro la desperdicie: hay un billete de intercambio en esta pequeña sociedad bien alimentada, calzada e instruida.

Aunque el maestro tiene una ventaja sobre el panadero y el zapatero, pues éstos pierden lo que dan, mientras que aquél no: da su lección y no deja de tenerla en su cabeza. Es la diferencia entre las perfecciones materiales e inmateriales: éstas son propias de agentes perfectos, que dan sin perder y mueven sin ser movidos, mientras que aquéllas son propias de agentes imperfectos, que pierden lo que dan y son movidos al mover:

- *Agentes perfectos*. Un maestro puede comunicar su ciencia y engendrar camadas y camadas de nuevos maestros sin por eso disminuir su ciencia en nada. Y por aquí se manifiesta que los principios vitales de animales y vegetales son inmateriales, porque también se transmiten sin pérdida, pues el papá oso no pasa a ser menos oso por cada camada de ositos, ni el árbol menos árbol al desparramar sus semillas.
- *Agentes imperfectos*. El calor del horno, en cambio, se pierde con cada horneada de pan que se cuece, y el cuerpo que trabaja sobre el elástico se frena en su impulso y pierde su energía cinética.

La diferencia entre agentes perfectos e imperfectos puede verse por tres partes:

- *En cuanto a la perfección transmitida*. Las perfecciones inmateriales no tienen contrario mientras que las materiales sí lo tienen. Los bienes espirituales que pueden transmitirse son hábitos intelectuales o morales, que no tienen contrario y no se generan por movimiento propiamente dicho (que sólo se da entre contrarios). Lo mismo ocurre con los principios vitales de animales y vegetales, que son formas substanciales inmateriales. Las perfecciones materiales, en cambio, son siempre a modo de cualidades pasibles, que se mueven entre contrarios pues, como se dijo, aún los movimientos de lugar y cantidad sólo pueden considerarse tales en la medida en que se dan con cierta contrariedad.
- *En cuanto al contacto entre el agente y paciente*. Los agentes inmateriales se aplican y tocan a sus pacientes, pero éstos no se aplican ni tocan a aquéllos: no hay contacto mutuo. Justamente porque no se obra entre contrarios del mismo género: la ciencia del maestro obra sobre la ignorancia de los discípulos,

pero ésta nada puede contra aquella, porque no son cosas del mismo orden[1]; y el alma o principio vital de los vivientes no encuentra tampoco un principio contrario en la materia sobre la que obra, pues no hay contrario de una forma substancial[2]. Los principios agentes materiales, en cambio, que se fundan en cualidades pasibles, tocan y son tocados, pues cuando se aplican sobre sus pacientes o móviles, hallan en ellos principios contrarios capaces de obrar de modo contrario sobre su propia materia. Lo caliente que se aplica sobre lo frío para moverlo al calor, está abierto a enfriarse, y sufre la aplicación de lo frío sobre sí mismo y, por lo tanto, es también paciente o movido con el movimiento contrario.

- *En cuanto a la acción*. Por lo dicho, la acción del agente inmaterial no sufre reacción, mientras que la acción del agente material sí la sufre, pues está abierto a que el móvil sea motor de un movimiento contrario del que el motor se hace móvil. Lo caliente calienta lo frío, y lo frío enfría lo caliente; lo que se mueve mueve lo quieto, y lo quieto aquieta lo que se mueve. La acción se da sobre el móvil proveniente del motor, y la reacción se da en el motor, en cuanto se comporta como móvil, y proviene del móvil, en cuanto se comporta como motor.

Las leyes de la causalidad, entonces, permiten entender que haya *ciclos conservativos* tanto en el orden de perfecciones y agentes inmateriales, como en el orden de perfecciones y agentes materiales. Y en cada caso se dan con una diferencia:

- *En un ciclo conservativo inmaterial*, la perfección que se conserva sin aumento ni disminución puede ser participada en un número mayor o menor de sujetos. La ciencia del maestro puede extenderse a toda una sociedad, o ser conservada sólo por una elite, lo que importa es que no se pierda, de manera que si el maestro muere, haya otros capaces de ocupar su lugar. Y si al cabo de un tiempo se halla que se sabe más, es porque alguno investigó algo nuevo, y en eso superó al maestro, o lo aprendió de otro maestro en ese punto superior. Algo semejante ocurre con – por ejemplo – el ciclo de los conejos en el bosque: lo que importa es que haya número suficiente de conejos para asegurar la conservación de la especie, aunque sean menos si creció la familia de depredadores o se llene el bosque de conejos si los depredadores desaparecieron.
- *En un ciclo conservativo material*, en cambio, como la perfección que se da se pierde, no se conserva sólo cualitativamente igual, sino también cuantitativamente. Si lo que se conserva, por ejemplo, son riquezas exteriores que pueden medirse en dinero, lo que importa es que a lo largo de los ciclos de intercambio la suma total de la riqueza que se mueve dé igual.

Podemos decir que la conservación de los ciclos inmateriales es cualitativa, o formal, o específica, mientras que la conservación de los ciclos materiales es cuantitativa, o material, o numérica. La disminución de la perfección debe explicarse por principios deficientes, ya sea la debilidad de los agentes o la indisposición de los pacientes. Mientras que el aumento de perfección debe explicarse por principios agentes en cierto modo exteriores. En este último caso el principio de causalidad nos pide ponernos alertas, pues no hay novedad sin causa: si entre los alumnos se sabe menos de lo que se enseñó, nadie se extraña, pero si se sabe más, ¡alerta, que entre ellos hay un genio! Si en el bosque se acabaron los conejos, fácilmente culpamos a la glotonería de los zorros, pero si aparecen ciervos, ¿de dónde salieron? Que no nos vengan con que evolucionaron los conejos para defenderse a cornadas.

2º Las leyes de Newton y la conservación del movimiento local

El orden del movimiento local y sus agentes es, considerado en sí mismo, el más material de todos los órdenes, pues tiene que ver con las relaciones dimensivas de los cuerpos. Y en los ciclos de movimientos locales, tanto antiguos como modernos observaron siempre cierta conservación. Pero los físicos modernos, sobre todo a partir de Newton, han puesto las leyes de conservación como principio y fundamento de la física nueva. Sin querer negar los méritos de este planteo, quisiéramos hacer justicia a los antiguos y poner las cosas más en su lugar.

Las leyes de conservación se siguen de las tres leyes de la mecánica de Newton:

---

[1] Salvo que el maestro tuviera que vérselas con un sofista, que tiene el vicio contrario a la virtud intelectual. Pero no es contrariedad propiamente dicha: si tiene clara su ciencia no se verá afectado por los sofismas.

[2] Podría alguno objetar que por qué no decimos lo mismo para las formas substanciales inorgánicas. Pero justamente las almas o formas substanciales de vivientes son orgánicas porque obran como agentes principales con la estructura material a modo de instrumento, mientras que las formas inorgánicas no pueden hacer eso, sino que obran en razón de sus partes. Los agentes principales no son las formas substanciales mismas, sino las cualidades de cada una de sus partes.

Las tres leyes de la dinámica de Newton	
Primera ley	Un cuerpo tiene una velocidad constante a menos que exista una fuerza neta que actúe sobre él
Segunda ley	La variación del *momento* de un cuerpo en razón del tiempo es proporcional a la fuerza neta aplicada, y se da en la misma dirección: $F = \frac{\partial mv}{\partial t}$
Tercera ley	A toda fuerza de acción de un cuerpo sobre otro se le opone una fuerza de reacción, de igual magnitud pero sentido contrario, de éste sobre aquél

La primera ley supone el *principio de inercia*, que sostiene la conservación del movimiento en un mismo cuerpo. Hemos señalado que esto necesariamente implica un cierto ciclo, invisible a los sentidos (y a los aparatos científicos) pero evidente al intelecto. Las leyes segunda y tercera tratan de los agentes del movimiento, e implican la conservación del movimiento en los intercambios entre cuerpo y cuerpo, lo que resulta evidente también a los sentidos. Consideremos, entonces, en primer lugar la conservación del movimiento en un mismo cuerpo, como propone el principio de inercia, y luego la conservación del movimiento entre diversos cuerpos, lo que está supuesto sobre todo por el principio de acción y reacción, propuesto por la tercera ley de Newton.

II. El principio de inercia o de conservación del movimiento

1º Evidencia del principio de inercia

Siempre se observó que hay diversas maneras de impulsar un cuerpo con más o con menos, y que éste conserva el impulso, yendo más cerca o más lejos. ¡Quién no se ha entretenido midiendo el que tira una piedra a mayor distancia! Pero *assueta vilescunt* (lo acostumbrado se vuelve despreciable): si el común de los hombres no se asombra del germinar de una semilla, siendo un fenómeno maravilloso pero que se ve cada año, menos todavía del vuelo de una piedra, que en cierto modo es igual de asombroso pero más frecuentado. ¿De dónde saca la semilla la energía y la inteligencia para hacer lo que hace? ¿Cómo hace una piedra para seguir su movimiento si ya nada la empuja? Éstas son las verdaderas preguntas que se hicieron los verdaderos científicos, y cuyas respuestas fueron señaladas por Aristóteles, el más sabio de todos ellos.

Pero los físicos modernos cuelan el mosquito y se tragan el camello[1]. Aceptan como un hecho de experiencia que el impulso cinético de los cuerpos *se conserva*, y se prohíben pensar acerca del proceso que sostiene ese movimiento, pues no se ve con los ojos de la cara sino del intelecto. Y hacen mucha bambolla porque han descubierto que el impulso se conserva *entero*. ¡Bien por ellos! Aristóteles no hubiera tenido ningún problema por aceptar este hecho – aunque con limitaciones, como diremos –, que es secundario y totalmente conforme con el principio de causalidad, pero seguiría exigiendo que se atienda a su planteo: ¿qué hace que un cuerpo se siga moviendo? Pero, en fin, reconozcamos que el mosquito no deja de ser interesante.

Aquí sobre la tierra se ve que todo movimiento tarde o temprano se detiene. Por eso los antiguos consideraban que el impulso cinético dado por un motor a un móvil permanecía un cierto espacio y tiempo, y luego se desvanecía. Aunque cualquiera observaba que un impulso dado a un rodado sobre un camino de piedra duraba un tramo, y que el mismo impulso dado a un vehículo del mismo peso, pero con rodamientos aceitados sobre rieles de hierro, iba mucho más lejos. Por eso no fue Newton el primero en darse cuenta que el impulso inercial tiende a conservarse sin disminución.

2º Algo de historia

Pierre Duhem, gran historiador de los asuntos físicos (aunque no muy devoto de Aristóteles), señala los antecedentes de los *principia* de Newton:

"*Dinámica – Teoría del ímpetu – Inercia – Las mecánicas celeste y sublunar: idénticas*. Convencido de que, en todo movimiento, el motor debía estar directamente contiguo al cuerpo movido, Aristóteles había propuesto una extraña teoría del movimiento de los proyectiles. Él sostuvo que el proyectil se movía por un medio fluido, sea agua o aire [o éter], a través del cual pasaba, y esto sucedía por virtud de la vibración que se produce en el fluido al momento del lanzamiento, que se expandía a través del mismo. En el siglo VI de nuestra era, esta explicación fue

[1] "Guías ciegos, que coláis un mosquito y os tragáis un camello" (Mt 23, 24).

vigorosamente adversada por Juan Filopón, de acuerdo con el cual el proyectil se movía por una cierta fuerza comunicada a él en el instante del lanzamiento; empero, a pesar de las objeciones planteadas por Filopón, varios comentaristas de Aristóteles, en particular Averroes, continuaron atribuyendo el movimiento del proyectil a la perturbación del aire; y Alberto Magno, Santo Tomás de Aquino, Roger Bacon, Gil de Roma y Walter Burley persistieron en mantener el [supuesto] error. Por medio de la más animosa argumentación, Guillermo de Ockham dio a conocer el completo absurdo de la teoría peripatética del movimiento de los proyectiles[1]. Volviendo a la tesis de Filopón, Buridán [discípulo de Ockham] dio el nombre de *ímpetu* a la virtud o poder comunicado al proyectil por la mano o instrumento que lo lanzan; él sostuvo que, en cualquier cuerpo en movimiento, este ímpetu era proporcional a la velocidad y que, en diferentes cuerpos en movimiento, propalados por la misma velocidad, las cantidades de ímpetu eran proporcionales a la masa o cantidad de materia definida como fue luego expuesta por Newton. En un proyectil, el ímpetu es gradualmente destruido por la resistencia del aire u otro medio y es destruido también por la gravedad del cuerpo en movimiento, la cual se opone al ímpetu si el proyectil es lanzado hacia arriba; esta lucha explica las diferentes peculiaridades del movimiento de los proyectiles. En un cuerpo que cae, la gravedad viene a asistir al ímpetu, el cual se incrementa a cada instante, de donde la velocidad de la caída crece incesantemente.

Con la asistencia de estos principios relativos al ímpetu, Buridán explica el mecerse del péndulo. Del mismo modo, analiza el mecanismo de impacto y rebote y, en este respecto, avanza visiones muy correctas sobre las deformaciones de las reacciones elásticas que surgen en las partes contiguas de dos cuerpos que llegan a colidir. Casi toda esta doctrina del ímpetus se transforma en una muy correcta teoría mecánica, si uno tiene cuidado de sustituir la expresión ímpetu por *vis viva*. La dinámica expuesta por Buridán fue adoptada en su integridad por Alberto de Sajonia, Oresme, Marsilio de Inghem y toda la Escuela de París. Alberto de Sajonia le anexó la afirmación de que la velocidad de un cuerpo en caída libre debe ser proporcional o bien al tiempo transcurrido desde el principio de la caída o a la distancia atravesada durante este tiempo. En un proyectil, el ímpetu es gradualmente destruido o por la resistencia del medio o por la tendencia contraria de la gravedad natural del cuerpo. Donde no existen estas causas de destrucción, el ímpetu permanece perpetuamente el mismo, como en el caso de una piedra de molino centrada exactamente y no rozando el eje; una vez puesta en movimiento dará vueltas indefinidamente con la misma velocidad. Fue de esta forma como la ley de la inercia se hizo evidente a Buridán y a Alberto de Sajonia. Las condiciones manifiestas en esta piedra de molino hipotética se realizan en las órbitas celestes, ya que en éstas ni la fricción ni la gravedad impiden el movimiento; de ahí se puede admitir que cada órbita celeste se mueva indefinidamente por virtud de un ímpetu apropiado comunicado a la misma por Dios en el momento de la Creación. Es inútil imitar a Aristóteles y a sus comentaristas atribuyendo el movimiento de cada órbita celeste a un espíritu que la presida. Ésta fue la opinión propuesta por Buridán y adoptada por Alberto de Sajonia; y, mientras formulaban una doctrina de la que la dinámica moderna iba a surgir, estos maestros entendieron que la misma dinámica gobierna tanto los cuerpos celestes como los sublunares. […]

La dinámica en el siglo XVI. Disipando la duda en la que Alberto de Sajonia había permanecido envuelto, Da Vinci había declarado que la velocidad adquirida por un cuerpo en caída libre era proporcional al tiempo empleado en la caída, pero él no supo cómo determinar la ley que conecta el tiempo consumido en la caída con el espacio atravesado por el cuerpo que cae. […] Esta ley, que Da Vinci no fue capaz de determinar, fue publicada en 1545 por el dominico español, Domingo de Soto (1494-1560), un alumno de la Universidad de París y profesor de teología en la Universidad de Alcalá de Henares y luego de Salamanca. Él formuló así estas dos leyes: a) La velocidad de un cuerpo que cae se incrementa proporcionalmente al tiempo de la caída. b) El espacio atravesado en un movimiento uniformemente variado es la misma que la de un movimiento uniforme que toma el mismo tiempo, si su velocidad es equivalente a la velocidad media del primero. En adición a ello, Soto declaró que el movimiento de un cuerpo lanzado verticalmente hacia arriba es uniformemente retardado. Debería mencionarse que todas estas proposiciones fueron formuladas por el célebre dominico como si tuvieran relación con verdades generalmente admitidas por los maestros entre los que vivió.

La teoría parisina, que mantiene que la caída acelerada de los cuerpo se debía al continuo incremento del ímpetu causado por la gravedad, fue admitida por Julio César Scalinger (1484-1558), Benedetti y Gabriel Vásquez (1551-1604), el célebre teólogo jesuita. El primero de estos autores presentó esta teoría de tal manera que la aceleración uniforme del movimiento parecía seguirse naturalmente de ella.

Soto, Tartaglia y Cardano hicieron arduos esfuerzos, a la manera de Da Vinci, para explicar el movimiento de los proyectiles mediante la apelación al conflicto entre el ímpetu y la gravedad, pero sus intentos se frustraron

[1] ¿Absurdo Aristóteles? Véase quién es el que le discute: el iniciador del nominalismo, movimiento de renuncia a la sabiduría escolástica.

por un error peripatético, que varios maestros parisinos habían rechazado hacía mucho tiempo. Ellos creyeron que el movimiento del proyectil se aceleraba desde el principio; y le atribuían esta aceleración inicial a un impulso comunicado por la vibración del aire. En efecto, a todo lo largo del siglo XVI, los averroístas latinos continuaron atribuyendo al aire ambiente la transportación misma del proyectil.

Tartaglia descubrió empíricamente que una pieza de artillería alcanzaba su más larga distancia cuando se apuntaba en un ángulo de 45 grados respecto del horizonte. Bruno insistió en la explicación de Oresme del hecho de que un cuerpo parece caer en línea vertical a pesar del movimiento de la Tierra; para obtener la trayectoria de este cuerpo es necesario combinar la acción de su peso con el ímpetu que la Tierra le imparte. Benedetti propuso la ley que se sigue de tal ímpetu, de la manera que se expone a continuación. Un cuerpo que rota en círculo y repentinamente es dejado a sí mismo se moverá en línea recta tangente al círculo en el mismo punto en el que se encontraba al momento en que fue soltado. Por este logro, Benedetti merece ser contado entre los más valiosos contribuyentes al descubrimiento de la ley de inercia. […]

La obra de Descartes. Descartes claramente formuló la ley de la inercia según había sido observada por Benedetti: todo cuerpo en movimiento está inclinado, si nada lo impide, a continuar su movimiento sobre la línea recta y con velocidad constante; un cuerpo no puede moverse en círculo a menos que sea impelido hacia el centro por un movimiento centrípeto en oposición a la fuerza centrífuga por la cual el cuerpo tiende a huir del centro. Dada la similitud de las visiones de Descartes y Benedetti en lo que respecta a esta ley, podemos concluir que el descubrimiento de Descartes fue influido por el de Benedetti, especialmente, por cuanto las obras de Benedetti eran conocidas por Martin Mersenne (1588-1648), el fiel amigo de Descartes con el que se carteaba este último. Descartes conectó la siguiente verdad con la ley de la inercia: un peso constante en volumen y dirección causa un movimiento uniformemente acelerado. Además hemos visto cómo, con la ayuda de los principios de Descartes, Gassendi fue capaz de rectificar lo que Galileo había enseñado en lo relativo a los cuerpos en caída libre y en el movimiento de proyectiles. […] Descartes mantuvo que, en cada cuerpo en movimiento, existía un cierto poder para continuar su movimiento en la misma dirección y con la misma velocidad; y él medía este poder, que llamó cantidad de movimiento, mediante la estimación del producto de la masa del cuerpo en movimiento por la velocidad que lo impele. La afinidad entre el papel que Descartes atribuyó a esta cantidad de movimiento y la que Buridán asignó al ímpetu es cercana. […]

La obra de Newton. La mayoría de las verdades dinámicas se descubrieron entre el tiempo de Galileo y Descartes y el de Huygens y Leibniz. La ciencia de la dinámica requería de un Euclides que la organizara como la geometría había sido organizada y este Euclides apareció en la persona de Isaac Newton (1642-1727), quien, en sus *Philosophiae naturalis principia mathematica*, publicado en 1687, dedujo con éxito la integridad de la ciencia del movimiento, con tres postulados: la inercia; la independencia de los efectos de fuerzas y movimientos previamente adquiridos; y la igualdad de la acción y la reacción”[1].

3º Necesario retorno a Aristóteles

Los empíricos modernos se han contentado con afirmar el hecho, medido con la mayor precisión y analizado con el mejor aparato matemático: los cuerpos conservan el movimiento. Se ven piedras en el espacio que hace siglos y milenios, y quizás millones de milenios que se mueven con el mismo movimiento por un impulso inicial. Pero este movimiento sigue exigiendo la explicación causal, y evidentemente no puede ser otra que la que propuso Aristóteles: los cuerpos mantienen su movimiento por acción y reacción con el medio, a modo de movimiento ondulatorio en medio elástico. Se ve que no es el aire este medio, sino lo que llena el espacio mal llamado vacío, a lo que muchos llaman éter. Muchas de las observaciones de la física moderna van en este sentido, ya sea la gravedad, ya la naturaleza ondulatoria que la mecánica cuántica reconoce en las partículas corpóreas. Pero los científicos modernos están infectados por una alergia causal, pues tienen miedo que si investigan las causas terminen yendo a Misa.

Aristóteles tiene también otra advertencia para hacerles: lo corpóreo no puede ser eterno, porque tiene un principio material de indeterminación que hace que nada dure mucho tiempo. Un cuerpo podrá conservar mucho tiempo su movimiento, pero no siempre. Y la física moderna, si fuera más sincera, tendría que declararse de acuerdo. La segunda ley de la termodinámica anuncia que la energía cinética se dispersa con el tiempo. Y de manera aún más radical, el principio de incertidumbre de la mecánica cuántica – si no nos equivocamos – supone una dispersión absolutamente irreductible de todo proceso físico.

[1] Pierre Duhem, extractos del artículo «Historia de la Física», escrita para la *Catholic Encyclopedia of America* (www.newadvent.org/cathen/12047a.htm), resumen de su obra en diez tomos.

III. LA CONSERVACIÓN DEL MOMENTO

1º El principio de acción y reacción y la conservación del momento

Las otras dos leyes de Newton implican la conservación del movimiento en las interacciones entre cuerpos. La primera ley dice que un cuerpo A en el espacio conserva su movimiento salvo que se aplique una fuerza sobre él. La segunda ley expresa la manera como una fuerza obra sobre un cuerpo, imprimiéndole una variación del momento proporcional a la magnitud de la fuerza. Ahora bien, esta fuerza tiene que serle aplicada por algún otro cuerpo B y, según las observaciones de la física moderna, puede producirse de diversas maneras: por atracción gravitatoria o por atracción-repulsión electromagnética, o también por las escondidas fuerzas nucleares fuerte y débil (la interacción elástica o plástica en el choque de cuerpos parece explicarse por las fuerzas electromagnéticas entre las partículas de los cuerpos). Pero la tercera ley advierte que ante toda fuerza que un cuerpo aplique sobre otro, por la razón que sea (gravedad, electromagnetismo, etc.), él mismo sufre una fuerza de reacción de igual magnitud y sentido contrario, por la que, en razón de la segunda ley, sufrirá una variación contraria en su propio momento:

$$F_A = -F_B \;\; \rightarrow \;\; \frac{\partial(mv)_A}{\partial t} = -\frac{\partial(mv)_B}{\partial t}$$

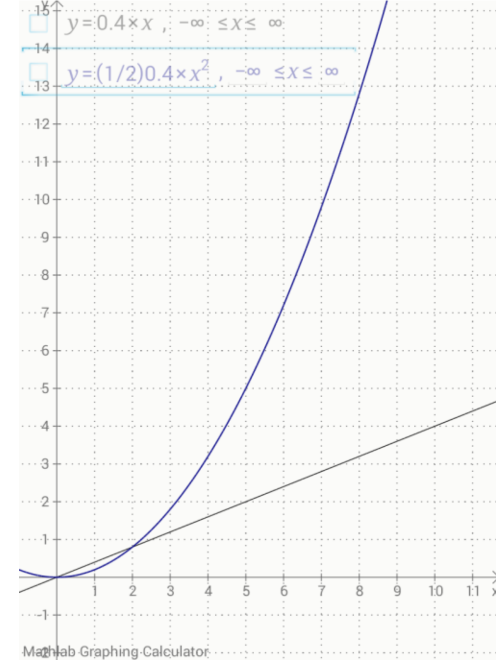
Como dijimos, la acción y reacción es propia de los agentes materiales, que no pueden mover sin ser movidos, y tanto más son movidos cuanto más mueven. Si empujamos un cuerpo, el cuerpo nos empuja en sentido contrario; si lo atraemos, nos atrae. Pero las variaciones de velocidad (aceleraciones) que uno imprime sobre otro depende de la relación entre masas: el gordo varía menos que el flaco. Cuando una niña salta a la cuerda, empujándose del piso y volviendo a caer por gravedad, la tierra salta por debajo de ella, pues al alejarse la aleja y al ser atraída la atrae. Claro que como la tierra es más gorda que la niña, se nota el movimiento de la niña y no se nota el de la tierra.

Lo que ocurre entre dos cuerpos, ocurre también entre tres y más. Si por la tubería de una nave espacial se ha escapado una nube de partículas ionizadas, con un momento total igual a la suma vectorial de los momentos de cada una de ellas: $m\vec{v}_{Total} = \sum_1^n m_i\vec{v}_i$ se van a producir infinidad de interacciones entre las partículas, pues toda partícula con carga eléctrica tiene una fuerza de atracción con las que tienen carga de signo opuesto y una fuerza de repulsión con las que tienen carga del mismo sentido. Es interesante el lío que se arma, pues cada carga positiva tiende a reunir en torno a ella a todas las cargas negativas, pero cuando las negativas se le acercan, se repelen entre ellas, queriendo cada una rodearse de positivas. No hay quien resuelva un problema de tanta complejidad, pero algo podemos saber: como a cada fuerza de una partícula sobre otra se produce una fuerza contraria sobre ella misma, y cada fuerza provoca una proporcional variación del momento, siempre el resultado de los cambios de momento por fuerzas interiores será nulo, y la sumatoria será en cada instante la misma que al comienzo. Es como la pequeña sociedad del billete, que siempre tiene un único billete para intercambiar: la cantidad de movimiento inicial del sistema se conserva, distribuida de manera diferente entre partícula y partícula, que se frenan y aceleran entre ellas, pero conservando siempre la suma total.

2º La conservación del momento y la energía cinética

La conservación del momento no implica, por sí misma, la conservación de la energía cinética, como la conservación de la energía cinética tampoco implica por sí misma la conservación del momento. Primero, porque el momento depende de la masa y de la velocidad por igual proporción, mientras que la energía cinética depende de la velocidad por doble razón. Segundo, porque el momento es magnitud vectorial, que se suma teniendo en cuenta la dirección, mientras que la energía cinética no.

Si dijéramos, por ejemplo, que en un choque elástico lo único que importa tener en cuenta es la conservación del momento, podríamos pensar que un cuerpo de momento m_1v_1, al chocar con otro cuerpo en reposo de masa m_2, le transmite una velocidad tal que el momento sea igual: $v_2 = \frac{m_1}{m_2}v_1$ Pero, entonces, si las masas de los cuerpos fueran desiguales, la energía cinética no se mantendría: $\frac{1}{2}m_2v_2^2 = \frac{1}{2}m_2(\frac{m_1}{m_2}v_1)^2 = \frac{m_1}{m_2}\,\frac{1}{2}m_1v_1^2$ Si m_2 fuera el doble de m_1, la energía cinética se reduciría a la mitad, si fuera la mitad, aumentaría al doble.



Hay que investigar este asunto con cuidado. La primera ley de Newton o ley de inercia dice que un cuerpo, al que no se le aplica ninguna fuerza, conserva su velocidad. Por lo tanto, conserva su momento y su energía cinética.

La segunda ley de Newton dice que, si a un cuerpo se le aplica una fuerza, esta le imprime una variación constante del momento (lo que supone una aceleración constante si la masa no depende de la velocidad). Pero vimos que el aumento constante de la velocidad supone un aumento geométrico de la energía cinética, que depende por doble razón de la velocidad. No es lo mismo empujar un vehículo que va despacio, que empujarlo con la misma fuerza a gran velocidad.

La tercera ley de Newton, que responde a la observación más cotidiana, dice que un cuerpo que aplica una fuerza sobre otro, recibe sobre sí una fuerza contraria, lo que nos permite sacar algunas conclusiones acerca de la interacción de un cuerpo con otro. Dijimos que las variaciones de momento entre cuerpos con movimiento inercial que interactúan se anulan, pues si uno varía su momento por razón de la fuerza que le aplica otro, el otro varía su momento en sentido contrario por la fuerza reactiva. Pero no pasa lo mismo con la energía cinética, porque el momento es, como la fuerza, magnitud vectorial, y los momentos contrarios se restan. Pero la energía es una magnitud absoluta, por lo que, cuando dos cuerpos se aceleran mutuamente, sea por atracción como por repulsión, cada uno aumenta su energía cinética, y ambas se suman a la energía total.

Es más, la igualdad de fuerzas nos hace ver que el aumento de energía cinética en uno y otro cuerpo es desigual, por lo mismo que una fuerza aplicada a un cuerpo en velocidad le aumenta más su energía cinética. Rápidamente podemos decir que, como los aumentos de velocidad de dos cuerpos que se atraen serán inversamente proporcionales a las masas, de manera que el que es doble de pesado aumenta con el tiempo mitad de velocidad, el cuerpo de menor masa alcanzará mayor energía cinética, pues esta aumenta con el cuadrado de la velocidad. Es el caso del disparo de un revólver. La explosión de la pólvora impulsa tanto la bala hacia adelante como el arma hacia atrás, con momentos contrarios iguales, pero como el arma es mucho más pesada que la bala, ésta adquiere mucha más energía cinética. Calculémoslo. Supongamos que el arma se dispara sin estar sujetada por la mano del tirador. La fuerza sobre la bala es igual a la fuerza sobre el arma, por lo tanto: $m_b a_b = m_a a_a$ Esta fuerza se aplica sobre cada masa el breve tiempo que la bala sigue dentro del caño, pues apenas sale los gases se descomprimen. Como la velocidad inicial es nula, suponiendo que la aceleración se mantiene constante ese breve tiempo, y como en el movimiento uniformemente acelerado $a = \frac{v}{t}$ reemplazando en la igualdad tenemos el mismo caso que el del choque anterior: $m_b v_b = m_a v_a \;\rightarrow\; \frac{1}{2} m_b v_b^2 = \frac{1}{2} m_b \left(\frac{m_a}{m_b} v_a\right)^2 = \frac{m_a}{m_b} \frac{1}{2} m_a v_a^2$ La razón de las energías cinéticas es inversamente proporcional a la razón de las masas. Si el arma pesara medio kilo y la bala 10 gramos, la energía cinética de la bala es 50 veces mayor.



Colt 45 automático
El Colt 45 automático es la pistola semiautomática más famosa. Elegida por primera vez en 1911 por las Fuerzas Armadas de los Estados Unidos siguió siendo la pistola oficial del ejército hasta mediados de la década de 1980.

El agente que ha sido capaz de aportar la energía de las dos partes es la pólvora, que tiene lo que se puede llamar energía química. Y si el momento total es nulo, se debe a la simetría de las fuerzas aplicadas. Algo semejante ocurre en la explosión de una granada, donde se proyectan multitud de esquirlas. Si se pudieran medir todas las partículas, con su masa y velocidad, se vería que la suma total de sus momentos es nula (siempre que explote en el aire). Pero, es curioso, las esquirlas más peligrosas son las más chicas, pues traen más energía (y por ser más chicas son más penetrantes).

IV. CASOS DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA

1º Choques elásticos y choques plásticos

El término «elástico» deriva del griego ἐλαστός, que significa «que puede ser empujado o dirigido» (viene del verbo ἐλαύνω: empujar o dirigir). Un cuerpo elástico es aquel que, al ser chocado o golpeado, conserva el empuje o impulso dado, de allí que se diga que «es apto para ser empujado». Esta propiedad se sigue de que al ser deformado, ya sea por compresión o extensión, es capaz de recuperar con fuerza su forma inicial, como ocurre con el resorte.

El término «plástico» deriva del griego πλαστικός, «que puede ser modelado», del verbo πλάσσω: modelar (la arcilla). De aquí deriva plasmar: dar forma, y plasma: materia informe. Un cuerpo plástico es aquel que conserva toda deformación que se le imprima, sin recuperar su forma inicial, de manera que al ser chocado o golpeado no conserva el impulso sino que en cierta manera lo absorbe. Si se golpea una bola elástica con un bate de béisbol, ésta se dispara con el impulso recibido, mientras que si se golpea una bola plástica, ésta se adhiere al bate.

Un *choque perfectamente elástico* entre dos cuerpos es aquel en el que puede suponerse que hay un perfecto resorte entre ambos cuerpos, cuyo trabajo de compresión (fuerzas de compresión por distancia de compresión) es exactamente igual al trabajo de extensión (fuerzas de descompresión por distancia de recuperación). Una bola perfectamente elástica que golpea contra una pared con cierto momento, rebota con exactamente el mismo momento, como vimos con el choque contra un resorte.

Un *choque perfectamente plástico* (o perfectamente inelástico) entre dos cuerpos es aquel en que los cuerpos se unen conformando un cuerpo único, con movimiento único, como cuando una bola de barro choca contra un bloque de barro.

La gran mayoría de los choques reales entre cuerpos tienen algo de elástico y algo de plástico, de manera que pueden acercarse más al choque elástico, como pasa con las bolas de billar, o más al choque plástico, como pasa con las bolas de barro (aún el barro tiene un mínimo de elasticidad).

La igualdad de fuerzas de acción y reacción (tercera ley de Newton) nos dice que, en todos los choques entre cuerpos con movimiento inercial, elásticos, plásticos o mixtos, se conserva el momento total antes y después del choque. Pero en los choques elásticos, además, se conserva la energía cinética, porque – como dijimos – la elasticidad de los cuerpos devuelve, en cierta manera, la energía empleada en la deformación provocada por el choque. Estos principios de conservación nos permiten decir algunas cosas acerca del resultado de un choque, aunque no sepamos exactamente la magnitud de las fuerzas en el proceso mismo del choque. Analicemos primero un caso de choque plástico, que es más simple, y luego uno de choque elástico.

2º Choque plástico



En una dimensión. Dos automóviles chocan de frente (a poca velocidad, para no matar a nadie). Los dibujos corresponden a dos modelos de Estados Unidos, un Buick Park Avenue (la General Motors absorbió la empresa Buick en 1920, pero siguieron fabricando sus modelos), con una masa de 1660 kg, que va a 8 km/h, y un Geo Metro de la mitad de peso, 830 kg, que viene a 10 km/h (en el que parece viajar una señora, a la que le atribuyen la culpa del choque). Suponemos un choque perfectamente plástico, donde los cuerpos se unen sin ningún rebote, y nos preguntamos por el estado final del amasijo de autos. La suma de los momentos iniciales debe ser igual al momento del amasijo final:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) v'$$

De allí podemos calcular la velocidad final v':

$$v' = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2} = \frac{m_1}{m_1 + m_2} v_1 + \frac{m_2}{m_1 + m_2} v_2$$

En nuestro caso hay que tener en cuenta que v_2, la velocidad del Geo, es negativa:

$$v' = \frac{1660}{1660 + 830} 8\,km/h - \frac{830}{1660 + 830} 10\,km/h = \frac{2}{3} 8\,km/h - \frac{1}{3} 10\,km/h = 2\,km/h$$

Los dos autos terminan moviéndose a 2 km/h en la dirección del más pesado. Si el que tiene mitad de masa hubiera venido al doble de velocidad, 16 km/h, los momentos serían iguales y se hubieran quedado inmóviles.

Como dijimos, la energía no se conserva. La relación de energías es distinta que la de momentos:

$$\frac{m_1 v_1}{m_2 v_2} = 2\frac{8}{10} = 1.6 \quad \neq \quad \frac{\frac{1}{2} m_1 v_1^2}{\frac{1}{2} m_2 v_2^2} = 2\frac{8^2}{10^2} = 1.28$$

Si el Geo fuera a 11.3 km/h, ya tendría una energía cinética igual al Buick. La energía cinética final es pequeña en comparación con la energía inicial:

$$\frac{\frac{1}{2}(m_1 + m_2) v'^2}{\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2} = \frac{3 \times 2^2}{2 \times 8^2 + 10^2} = 0.05$$

Es más, cuando los momentos son iguales, la energía cinética final es nula. Si la energía cinética es la capacidad que tenía cada cuerpo para mover, ¿qué ha pasado con ella? En el caso de choque plástico, se invierte en calor, lo que ya iremos viendo mejor.

En dos dimensiones. El principio de conservación del momento es fecundo, porque como el momento es dimensión vectorial, vale también para choques en diversas direcciones. Supongamos ahora que el señor del Buick,

fastidiado por el choque anterior, choca en una esquina a la misma señora, que conduce un nuevo Geo, también a las mismas velocidades, que era iracundo pero no criminal. El planteo es el mismo, pero ahora teniendo en cuenta que las velocidades son magnitudes vectoriales:

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = (m_1 + m_2)\vec{v}$$

La velocidad final se halla calculando las componentes del choque en las direcciones x e y:

$$m_1\vec{v}_1 = (m_1 + m_2)\vec{v}_x \quad \rightarrow \quad v_x = \frac{m_1}{m_1 + m_2}v_1$$

$$m_2\vec{v}_2 = (m_1 + m_2)\vec{v}_y \quad \rightarrow \quad v_y = \frac{m_2}{m_1 + m_2}v_2$$

Si reemplazamos por los valores dados (teniendo en cuenta que ahora el Buick es m_2), nos da:

$$v_x = \frac{10}{3}km/h \qquad v_y = \frac{2 \times 8}{3}km/h$$

La magnitud de la velocidad final es:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \tfrac{1}{3}\sqrt{10^2 + 16^2}\,km/h = 6.3\,km/h$$

Y el ángulo se puede calcular por la función inversa de la tangente:

$$\theta = \tan^{-1}\frac{v_y}{v_x} = 58º$$

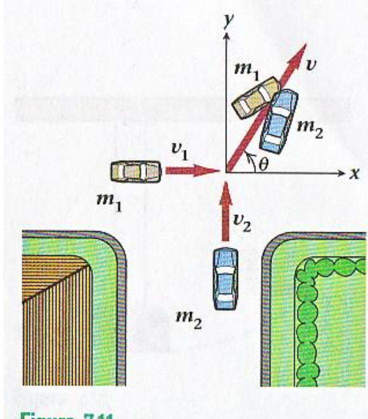


Figura 7.11
Ejemplo 7.7: Choque perfectamente no elástico en dos dimensiones. Los dos vehículos permanecen juntos después del impacto.

3º Choque elástico

En una dimensión. En el choque elástico no sólo se conserva el momento, sino también la energía cinética, pues el medio elástico devuelve – si así puede decirse – el trabajo que se hace al comprimirlo, mientras que en el choque plástico ese trabajo se transforma en calor. Vimos que, cuando dos cuerpos que se mueven en la misma dirección chocan plásticamente, el cuerpo total se mueve a una velocidad tal que conserva el impulso: si chocara plásticamente una bola de barro a cierta velocidad con otra quieta de la misma masa, el emplaste total de doble masa se movería a la mitad de la velocidad. Pero si el choque no es perfectamente plástico, los cuerpos se separan por cierto rebote, conservando cada uno cierta velocidad, que siempre es tal que el momento total se conserva: si las bolas que chocan fueran de madera, que no son perfectamente elástica pero tampoco perfectamente plásticas, la bola quieta se movería a más de la mitad de la velocidad y la bola que choca se frenaría un poco, siempre de modo que se conserve el momento. ¿Qué pasaría si las bolas fueran de billar, perfectamente elásticas? Además del impulso, se conservaría la energía cinética, y es fácil comprobar que hay unas únicas velocidades finales que cumplen ambas condiciones. Hagamos el planteo para dos cuerpos con diversos momentos que chocan en la misma dirección (a las velocidades finales después del choque le ponemos tilde):

$$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1v'_1 + m_2v'_2$$
$$\tfrac{1}{2}m_1v_1^2 + \tfrac{1}{2}m_2v_2^2 = \tfrac{1}{2}m_1v'^2_1 + \tfrac{1}{2}m_2v'^2_2$$

Antes de intentar resolver esta doble ecuación podemos sacar un resultado indicador. Le damos a la primera la siguiente forma:

$$m_1(v_1 - v'_1) = -m_2(v_2 - v'_2)$$

De la segunda eliminamos el factor común ½, y la ordenamos de manera semejante a la primera:

$$m_1(v_1^2 - v'^2_1) = -m_2(v_2^2 - v'^2_2)$$

La diferencia de cuadrados se puede descomponer: $a^2 - b^2 = (a + b)(a - b)$ por lo que nos da:

$$m_1(v_1 - v'_1)(v_1 + v'_1) = -m_2(v_2 - v'_2)(v_2 + v'_2)$$

Si ahora dividimos esta ecuación por la del momento, tenemos:

$$(v_1 + v'_1) = (v_2 + v'_2)$$

Reordenando las velocidades, tenemos:

$$v_1 - v_2 = -(v'_1 - v'_2)$$

Esto quiere decir que, independientemente de la masa de los cuerpos, la velocidad relativa anterior al choque se invierte después del choque. Si se acercaban a cierta velocidad, luego se alejan a la misma velocidad. Era de esperar por la simetría de la reacción elástica.

De esta última ecuación y la ecuación de momentos podemos calcular el valor de ambas velocidades:

$$v'_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_1 + \frac{2m_2}{m_1 + m_2} v_2$$

$$v'_2 = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_1 - \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_2$$

Hay casos más simples. Si, como pusimos, la masa de las bolas de billar es igual y una está quieta, nos da:

$$v'_1 = 0 \quad \text{y} \quad v'_2 = v_1$$

El que juega al billar sabe por experiencia que así ocurre (aunque también sabe que hay que tener en cuenta el giro de las bolas). Siempre que las masas sean iguales, el resultado es que las velocidades se intercambian:

$$v'_1 = v_2 \quad \text{y} \quad v'_2 = v_1$$

Si las masas son distintas pero un cuerpo está quieto, tenemos:

$$v'_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_1 \qquad v'_2 = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_1$$

Vemos que, si la masa del primer cuerpo es mayor que la del que está quieto, ambas velocidades son positivas, es decir, siguen ambos cuerpos en la misma dirección. Si la masa del primer cuerpo es menor, éste rebota con una velocidad negativa, mayor mientras mayor sea la diferencia de masas. Si el cuerpo en reposo es tanto mayor que la masa del primero puede considerarse despreciable en su comparación, como cuando la pelota de tenis choca contra el tenista, nos queda: $v'_1 = \frac{-m_2}{m_2} v_1 = -v_1 \qquad v'_2 = 0$ Es el simple y clásico rebote elástico.

En dos dimensiones. Hasta ahora hemos considerado choques en una misma dirección. Si quisiéramos calcular choques en dos dimensiones, como el choque de bolas de billar en el plano de la mesa de juego, nos hallaríamos en un problema. Como vimos para el choque plástico, el momento es magnitud vectorial y la ley de conservación del momento se debe cumplir por separado para cada dimensión del plano, por lo que nos ofrece dos ecuaciones de conservación en cada eje x e y. Pero la energía no es magnitud vectorial sino escalar, por lo que la ley de conservación de la energía no necesariamente tiene que cumplirse por separado según cada eje, y sólo nos permite plantear una única ecuación para la energía total. Tendríamos un sistema de tres ecuaciones, pero las incógnitas a hallar serían cuatro, pues se trata de averiguar las componentes v_x y v_y de la velocidad de cada una de las bolas después del choque. Y un sistema de tres ecuaciones para cuatro incógnitas tiene infinitas soluciones. Nos hace falta un dato o una ley más para que la resolución sea única.

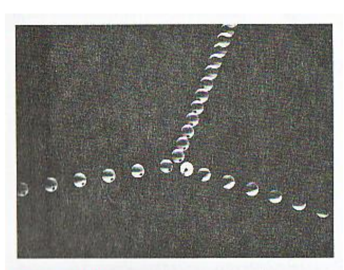
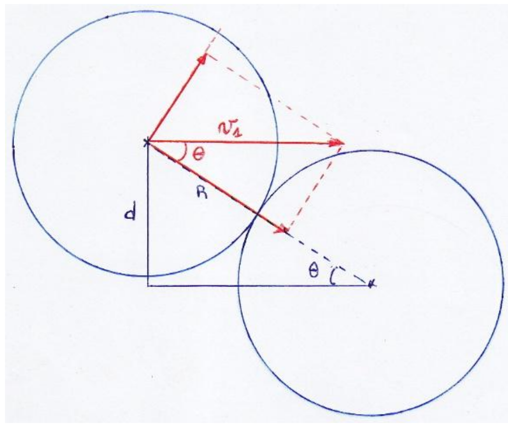


Figura 8.10
Ejemplo 8.4: Fotografía de destellos múltiples de una colisión elástica entre dos bolas de igual masa. Después del choque, las dos bolas se alejan en ángulo recto una respecto a otra.



Este cuarto dato o ley nos lo puede proporcionar la geometría del choque. Supongamos el caso más clásico de una bola de billar que golpea otra bola quieta. El que juega al billar sabe que, para que ambas bolas se abran en ángulo, tiene que apuntar de manera que la dirección de la bola no pase por el centro exacto de la bola quieta, sino tocándola de lado, y que mientras más de lado le dé, menos se abre la bola impulsada y más la bola quieta. En el gráfico se ve la geometría del choque de dos esferas que no se golpean de frente. La dirección de la bola impulsada hace que su centro pase a una distancia d del centro de la bola quieta, ambas de radio R. Si $d = 0$ el choque es de frente, y vale el análisis para choque unidimensional, si $d \geq 2R$ la bola pasa de lado sin chocar. Si las bolas fueran tan rígidas que pudiera considerarse que se tocan en un punto – lo que no está lejos de la realidad con las bolas de billar –, la única fuerza que se hace sobre la bola quieta es perpendicular al punto de tangencia, siguiendo la línea de centro a centro de las esferas. Por lo tanto, el choque que sufre la bola quieta, es equivalente al de una bola que le diera de frente con una velocidad igual a la componente en esta dirección de la velocidad de la bola impulsada: $v_1 \cos\theta$ Como vimos, cuando un cuerpo choca elásticamente a otro quieto de igual masa, el primero queda quieto y el segundo toma su velocidad. Por lo tanto, la bola quieta saldrá disparada en la dirección θ con una velocidad $v_1 \cos\theta$ Mientras que la primera bola perderá su velocidad en dicha dirección, y saldrá en dirección perpendicular a una velocidad $v_1 \sin\theta$ Puede comprobarse en la mesa de billar que en estos choques las bolas siempre se abren en ángulo recto.

Es evidente que se conserva el momento total, pues seguimos teniendo el mismo momento según las dos componentes del ángulo θ. Pero quizás no sea tan evidente que se conserva también la energía cinética, lo que podemos comprobar. Tendría que darse la siguiente igualdad:

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m(v\cos\theta)^2 + \frac{1}{2}m(v\sin\theta)^2$$

Si simplificamos todos los factores comunes, nos queda: $\cos\theta^2 + \sin\theta^2 = 1$ que es una de las identidades que nos enseña la trigonometría.

Muchos otros asuntos se pueden considerar en relación con el principio de inercia. Nos queda sobre todo por investigar la dinámica rotacional. Pero nos parece que ya es hora de estudiar otro fenómeno casi tan general como la inercia e íntimamente relacionado con ella: la gravedad. Entonces podremos analizar las causas de los movimientos, también los rotatorios, de manera más completa.

Capítulo Quinto
Inercia y gravedad

Cuando se trata de investigar una realidad natural, ya sea una cosa o un fenómeno, sabemos cómo proceder: nos preguntamos *an sit*, *quid sit*, *quia est* y *propter quid*. Comencemos, entonces, considerando la existencia de la gravedad (*an sit*), luego su naturaleza (*quid sit*) y propiedades (*quia est*), para finalmente investigar sus causas (*propter quid*). A lo largo de este estudio irá apareciendo por qué no la separamos de la inercia.

A. Existencia y naturaleza de la gravedad

I. EXISTENCIA DE LA GRAVEDAD

1º Acerca del nombre

«Gravedad», *gravitas* en latín, es el abstracto del adjetivo «grave», *gravis*: pesado, por lo que quiere significar aquello que hace tales a las cosas *graves*. Existe también el verbo «gravar», en latín *gravo, gravare*, pesar sobre algo o alguien, pero el sentido primero es el del adjetivo, porque se trata de una condición o cualidad muy general de las cosas. El hombre siempre ha tenido que luchar con la pesantez de las cosas, de allí que este adjetivo haya estado en el vocabulario del hombre desde lo más antiguo, y haya derivado en multitud de sentidos análogos. En griego, la palabra equivalente es βαρύς (de donde viene *barómetro*, aparato que mide la presión o pesantez del aire). Aunque los filólogos no están seguros, las palabras latina y griega parecen estar emparentadas, pues en sánscrito pesado se dice *gurú*, donde se tiene la *g* de la que puede venir *gravis*. El opuesto es «leve», *levis*, que viene del griego λέπις, corteza, escama, piel, lámina.

De significar la pesantez de los cuerpos que, después de la cantidad, es la cualidad corporal más notable, pasó a significar en general algo de gran entidad, ya sea física o espiritual. Así se dice de un sonido de baja frecuencia (opuesto a agudo), de una persona seria, de palabras de serio sentido, de una enfermedad, etc. Comentando el Salmo 34, 18: "Te alabaré en un pueblo grave", dice Santo Tomás: "La gravedad a veces se toma en bien, y a veces en mal; porque de manera semejante hay una doble propiedad en la gravedad corporal. Una es la *pesantez*, que tiende a lo bajo, y ésta es mala, porque el hombre se dice grave según que tiende a la semejanza y pesantez de la tierra: «Hijos de los hombres, ¿hasta cuándo seréis graves de corazón?» (Sal 4) «¡Pueblo gravado de iniquidad, raza malvada, hijos desnaturalizados!» (Is 1, 4). Otra propiedad es la *estabilidad*, que se opone a la levedad, y no se conmueve. Se dice leve al hombre que «se deja llevar de todo viento» (Ef 4, 14). Al que es estable en el bien se le dice grave: «Las cartas son graves y fuertes» (2 Cor 10, 10)".

2º La gravedad de los cuerpos según Aristóteles

Los hombres siempre observaron el contraste de dos cosas: que los cuerpos celestes están suspendidos en el cielo en sus giros circulares, mientras que los cuerpos terrestres tienden a caer en dirección vertical. Y en cuanto

a éstos últimos notaron dos cosas más: que los cuerpos muy poco pesados caen menos rápido y que hay ciertos cuerpos que no tienden a caer sino a subir. A aquéllos los llamaron graves, y a éstos leves.

Aunque no está bien decir que los cuerpos más pesados caen más rápido, porque es evidente que si se cae una pared de piedras, no importa si estas piedras están unidas con cemento o no, cayendo siempre a la misma velocidad. Si dijéramos que lo pesado cae más rápido, la pared cementada formaría un cuerpo muchísimo más pesado que las piedras separadas, y es evidente que el hecho de estar cementada o no, no cambia nada a la hora de venirse abajo. Por eso hay que decir que los cuerpos que parecen caer más despacio son los menos densos, es decir, los que tienen menos peso para un mismo volumen. Se ve que un techo de paja cae menos rápido que uno de piedra.

Los antiguos distinguieron cuatro elementos terrestres, la tierra, el agua, el aire y el fuego, y notaron cómo se disponen, en la dirección vertical, según el orden mencionado. Esto los llevó a precisar que los cuerpos graves son aquellos en los que predomina la tierra o participan de alguna manera del elemento tierra, mientras que los cuerpos leves son aquellos en que predomina el fuego o participan del fuego. Es notable como el aire caliente tiende a lo alto, y que lo mismo pasa con los cuerpos acuosos y aún con los terrosos, pues en un horno de fundición de metales, la parte todavía sólida se queda en el fondo, mientras que la que se licúa tiende hacia arriba.

Como el lugar es una de las propiedades fundamentales de los cuerpos, y el movimiento local responde a la misma naturaleza corpórea de las cosas, se hace evidente que los cuerpos celestes no están compuestos de ninguno de los cuatro elementos terrestres, que son graves o leves, con desplazamientos según la vertical, sino que se componen de un quinto elemento con desplazamiento circular. Ésta es la conclusión a la que llega Aristóteles[1]:

"De todos los cuerpos y magnitudes naturales decimos que son de por sí móviles con respecto al lugar; decimos, en efecto, que la naturaleza es el principio de su movimiento. Ahora bien, todo movimiento con respecto al lugar, al que llamamos traslación, (ha de ser) rectilíneo o circular o mezcla de ambos: estos dos, en efecto, son los únicos simples. La razón es que sólo estas magnitudes son simples, a saber, la rectilínea y la circular. Circular, pues, es (el movimiento) en torno al centro, y rectilíneo, el ascendente y el descendente. Y llamo ascendente al que se aleja del centro, descendente, al que se acerca al centro. De modo que, necesariamente, toda traslación simple ha de darse desde el centro, hacia el centro o en torno al centro. Y esto parece desprenderse lógicamente de lo dicho al principio: en efecto, el cuerpo y su movimiento alcanzan la perfección con el número tres[2].

Y puesto que, de los cuerpos, unos son simples y otros son compuestos de aquéllos (llamo simples a todos los que tienen por naturaleza un principio de movimiento, como el fuego, la tierra y sus especies y (elementos) afines), por fuerza los movimientos han de ser también simples unos y mixtos de alguna manera los otros, y los de los (cuerpos) simples serán simples y los de los compuestos, mixtos, moviéndose según el (elemento) predominante.

Dado, pues, que existe el movimiento simple, que el movimiento circular es simple y que el movimiento del cuerpo simple es simple y el movimiento simple lo es de un cuerpo simple (en efecto, aun cuando lo fuera de uno compuesto, sería con arreglo al (elemento) predominante), es necesario que haya un cuerpo simple al que corresponda, de acuerdo con su propia naturaleza, desplazarse con movimiento circular. Cabe, sin duda, que, de manera forzada, uno (se desplace) con arreglo al (movimiento propio) de otro, pero es imposible (que eso ocurra) de manera natural, pues el movimiento correspondiente a la naturaleza de cada uno de los (cuerpos) simples es uno solo.

Además, si el (movimiento) antinatural es contrario al natural y el contrario de uno es uno solo, entonces, dado que el (movimiento) en círculo es simple, si no fuera conforme a la naturaleza del cuerpo que (así) se desplaza, forzosamente sería contrario a su naturaleza. Así, pues, si lo que se desplaza en círculo fuese fuego o algún otro de los (elementos) de esta clase, la traslación natural de éste sería contraria a la circular. Pero uno solo es el contrario de uno; ahora bien, el (movimiento) hacia arriba y el (movimiento) hacia abajo son mutuamente contrarios. Por otro lado, si lo que se desplaza en círculo de manera antinatural es otro cuerpo cualquiera, éste tendrá algún otro movimiento natural. Pero eso es imposible, pues si (el movimiento) es hacia arriba, se tratará de fuego o de aire, y si es hacia abajo, de agua o de tierra.

Pero además la traslación de ese tipo ha de ser necesariamente primaria. Pues lo perfecto es anterior por naturaleza a lo imperfecto, y el círculo está entre las cosas perfectas, mientras que no lo está ninguna línea recta;

---

[1] Aristóteles, *Acerca del cielo*, libro I, cap. 2, Editorial Gredos, trad. Miguel Candel, Madrid 1996, p. 44-49.

[2] Aristóteles, *Acerca del cielo*, libro I, cap. 1 (Gredos, p. 42): "De las magnitudes, la que (se extiende) en una (dimensión) es una línea, la que en dos, una superficie, la que en tres, un cuerpo. Y aparte de éstas, no hay más magnitudes, puesto que tres son todas (las dimensiones posibles) y «tres veces» (equivale a) «por todas partes». En efecto, tal como dicen también los pitagóricos, el todo y todas las cosas quedan definidos por el tres; pues fin, medio y principio contienen el número del todo, y esas tres cosas constituyen el número de la tríada. Por eso, habiendo recibido de la naturaleza, como si dijéramos, sus leyes, nos servimos también de ese número en el culto de los dioses. Y damos también las denominaciones de esta manera: en efecto, a dos objetos los designamos como «ambos», y a dos personas, como «uno y otro», pero no como «todos»; sin embargo, acerca de tres empezamos ya a emplear esa expresión. Seguimos estas (pautas), como se ha dicho, porque la propia naturaleza así lo indica".

en efecto, ni lo está la indefinida (pues no tendría en ese caso un límite y un final), ni ninguna de las limitadas (pues algo queda fuera de todas ellas: en efecto, es posible alargarlas indefinidamente). Por consiguiente, y puesto que el movimiento primario es (propio) de un cuerpo primario por naturaleza y el (movimiento) en círculo es anterior por naturaleza al rectilíneo y el (movimiento) en línea recta es (propio) de los cuerpos simples (en efecto, el fuego se desplaza en línea recta hacia arriba y los cuerpos terrosos hacia abajo, en dirección al centro), también el movimiento circular será necesariamente (propio) de uno de los cuerpos simples; pues ya dijimos que la traslación de los mixtos tenía lugar con arreglo al (elemento) simple predominante en la mezcla.

A partir de esto (resulta) evidente, entonces, que existe por naturaleza alguna otra entidad corporal aparte de las formaciones de acá, más divina y anterior a todas ellas; de igual modo, si uno considera que todo movimiento es, bien conforme a la naturaleza, bien contrario a ella, entonces también (considerará) que el (movimiento) que para un (cuerpo) es contrario, para otro es conforme a la naturaleza, como sucede, por ejemplo, con el (movimiento) hacia arriba y el (movimiento) hacia abajo. Éste, en efecto, es antinatural b para el fuego y aquél para la tierra, y viceversa. Es necesario, por consiguiente, que el movimiento en círculo, ya que para estos (elementos) es ajeno a su naturaleza, sea conforme a la naturaleza de algún otro.

Además de esto, si el desplazamiento en círculo es natural en alguna cosa, está claro que habrá algún cuerpo, entre los simples y primarios, en el que sea natural que, así como el fuego se desplaza hacia arriba y la tierra hacia abajo, él lo haga naturalmente en círculo. Ahora bien, si lo que se desplaza circularmente se mueve de manera antinatural en su traslación en derredor, (resulta) sorprendente y completamente ilógico que ese movimiento sea el único continuo y eterno, siendo antinatural; parece, en efecto, que en los de- más casos lo antinatural se destruye muy rápidamente.

De modo que, si lo que se desplaza es fuego, tal como algunos dicen, no menos antinatural es para él este movimiento que el (movimiento) hacia abajo: pues vemos que el movimiento del fuego (es) el que se aleja en línea recta del centro.

Por consiguiente, razonando a partir de todas estas (consideraciones), uno puede llegar a la convicción de que existe otro cuerpo distinto, aparte de los que aquí nos rodean, y que posee una naturaleza tanto más digna cuanto más distante se halla de los de acá".

Siguiendo estas líneas de pensamiento, no sólo por la autoridad de Aristóteles, sino por la fuerza de la observación, los sabios consideraron, por largo tiempo, la mecánica celeste y la terrestre de manera separada, buscando explicar aquella por movimientos cíclicos, y explicando a ésta por los movimientos naturales de cuerpos graves y leves.

3º La mecánica celeste de Ptolomeo

"Aunque en el tiempo del nacimiento de Cristo – comienza diciendo el artículo ya citado de Pierre Duhem, el historiador de la Física – la ciencia helénica había producido casi todas sus obras maestras, todavía le faltaba dar al mundo la astronomía de Ptolomeo, para la cual había un camino que había sido pavimentado hacía más de un siglo por los trabajos de Hiparco. Las revelaciones del pensamiento griego sobre la naturaleza del mundo exterior terminaron con el «Almagesto» [la obra maestra de Ptolomeo], que apareció hacia el 145 d.C.; y, entonces, empezó el declinar del conocimiento antiguo. Aquéllos de sus trabajos que escaparon de las llamas encendidas por los guerreros mahometanos fueron sujetos a las interpretaciones estériles de comentaristas musulmanes y, como semillas secas, esperaron el tiempo cuando la Cristiandad latina forjaría el suelo favorable en el cual pudieran florecer y dar fruto una vez más. De ahí que el tiempo cuando Ptolomeo puso los toques finales a su *Gran sintaxis de la astronomía* parezca el más oportuno para estudiar el campo de la física antigua.

Una frontera impasable separó este campo en dos regiones en las cuales prevalecieron leyes diferentes. Desde la órbita de la Luna a la esfera que encierra al mundo, se extendía la región de los seres exentos de la generación, el cambio y la muerte, de seres perfectos y divinos, y éstos eran las esferas de las estrellas y las estrellas mismas. Dentro de la órbita lunar, yace la región de la generación y la corrupción, donde los cuatro elementos y los cuerpos mezclados, generados por sus mutuas combinaciones, estaban sujetos al cambio perpetuo.

La ciencia de las estrellas estuvo dominada por un principio formulado por Platón y los pitagóricos, de acuerdo con los cuales todos los fenómenos presentados a nosotros por los cuerpos celestes deben ser explicados por combinaciones de movimientos circulares y uniformes. Aún más, Platón declaró que estos movimientos circulares eran reductibles a la rotación de los globos sólidos, todos limitados por superficies esféricas concéntricas, con la Tierra como centro; y algunas de estas esferas concéntricas llevaban estrellas fijas o errantes [los planetas visibles].

Eudoxo de Cnido, Calipo y Aristóteles compitieron entre sí en la lucha por avanzar esta teoría de las esferas concéntricas, cuya hipótesis fundamental se halla incorporada en la *Física* y en la *Metafísica* de Aristóteles.

Sin embargo, la astronomía de las esferas concéntricas no podía explicar todos los fenómenos celestes, de los que un número considerable mostraban que las estrellas errantes no permanecían siempre a una distancia igual de la Tierra. Heráclides Póntico, en el tiempo de Platón, y Aristarco de Samos, alrededor del 280 a.C., emprendieron la tarea de dar cuenta de todos los fenómenos astronómicos mediante un sistema heliocéntrico, que era un esquema de la mecánica copernicana; pero los argumentos de la física y los preceptos de la teología que proclamaban la inmovilidad de la Tierra obtuvieron briosamente la ascendencia sobre esta doctrina, que existía como un mero esbozo. Entonces, los trabajos de Apolonio de Perge (en Alejandría, 205 a.C.), de Hiparco (quien practicaba la observación en Rodas, en 128 y 127 a.C.) y, finalmente, de Ptolomeo (Claudio Ptolomeo de Pelusio) constituyeron un nuevo sistema astronómico que pretendió que la Tierra era el centro del universo; un sistema que parecía que se iba a completar, como lo fue, en efecto, cuando, entre 142 y 146 d.C., Ptolomeo escribió un trabajo llamado *Megale mathematike syntaxis tes astronomías*, cuyo título árabe fue transliterado por los cristianos en la edad media, quienes lo llamaron el «*Almagesto*». La astronomía del *Almagesto* explicaba todos los fenómenos astronómicos con una precisión que pareció satisfactoria por un largo tiempo, explicando dichos fenómenos mediante combinaciones de movimientos circulares; pero, de los círculos descritos, algunos eran excéntricos al mundo, mientras otros eran círculos epicíclicos; cuyos centros describían círculos deferentes concéntricos o excéntricos respecto del mundo; aún más, el movimiento sobre la deferente ya no fue uniforme, pareciendo de tal modo sólo cuando fuera visto desde el centro de la ecuante. En resumen, a fin de construir un arreglo cinemático por el que los fenómenos pudieran ser representados de manera precisa, los astrónomos cuyo trabajo Ptolomeo completó tenían que reducir a la nada las propiedades adscritas a las sustancias celestes por la *Física* de Aristóteles; y, entre esta *Física* y la astronomía de las excéntricas y los epiciclos, se desató una violenta lucha que duró hasta la mitad del siglo XVI".



Sistema de Tolomeo
En el siglo II d.C., Claudio Tolomeo planteó un modelo de Universo con la Tierra en el centro. Cada cuerpo celeste giraba en un pequeño círculo denominado epiciclo, centrado en un punto que giraba a su vez alrededor de la Tierra en un gran círculo denominado deferente. El modelo representaba los movimientos de los cuerpos celestes de una forma bastante precisa, pero no ofrecía una explicación física de ellos. El modelo de Tolomeo fue aceptado durante más de mil años.

4º El antiaristotelismo y los preliminares de una universalización de la gravedad

Entre los siglos XII y XIII llegaron las obras de Aristóteles a las curiosas Escuelas cristianas, que inmediatamente se pusieron a escudriñarlas. Como se intuía que en ellas había mucha verdad, surgió entonces el aristotelismo escolástico como una gran novedad, que no sin motivo inquietó a las autoridades eclesiásticas, por constituir un pensamiento pagano que se insertaba demasiado rápido en la sabiduría cristiana. Como era inevitable ante un pensamiento tan alto, la mayoría siguió un *aristotelismo material*, más sujeto a la letra que al espíritu que, para colmo de males, venía deformado por los comentarios árabes que lo adornaban, especialmente los de Averroes. Empezando con San Alberto Magno y sólo con Santo Tomás se tuvo un *aristotelismo formal*, que penetró en su esencia y lo purificó de sus errores, elevando la doctrina tomista a la cumbre de la sabiduría cristiana y humana.

En parte por los abusos del aristotelismo material, en parte porque la *Física* de Aristóteles era la ciencia que más tenía para progresar – progreso que está totalmente en el verdadero espíritu aristotélico –, en parte por malas razones, como celos e incapacidad de ponerse a la altura del aristotelismo formal, siempre fue fuerte la corriente antiaristotélica de la escolástica, que arremetió principalmente contra lo más débil del peripatetismo: su cosmología. Así lo sigue contando Duheim, de quien – repetimos – estimamos los datos históricos, pero no estimamos sus juicios en teología ni en aristotelismo:

"*Los artículos de París (1277)*. La Universidad de París estaba muy inquieta a causa del antagonismo entre los dogmas cristianos y ciertas doctrinas peripatéticas; y en varias ocasiones combatió la influencia aristotélica. En 1277, Etienne Tempier, obispo de París, actuando bajo el consejo de los teólogos de la Sorbona [la Universidad de París], condenó un gran número de errores, algunos de los cuales emanaban de la astrología y otros de la filosofía de los peripatéticos. Entre estos errores considerados peligrosos para la Fe, estaban varios que podrían haber impedido el progreso de la ciencia física y de ahí que los teólogos de París declararan errónea la opinión de que Dios no podía dar al universo entero un movimiento rectilíneo, debido a que el universo dejaría atrás entonces un

vacío tras de sí; y declararon también falsa la noción de que Dios no pudo crear varios mundos. Estas condenas destruían ciertos fundamentos esenciales de la física peripatética; porque, aunque, en el sistema de Aristóteles, tales proposiciones eran ridículamente insostenibles, la creencia en la omnipotencia divina decretaba su posibilidad, mientras se esperaba que la ciencia confirmara si eran verdaderas o no. Por ejemplo, la física de Aristóteles trataba a la existencia de un espacio vacío como un absurdo; en virtud de los *Artículos de París,* Richard of Middletown (alrededor de 1280) y, después de él, muchos maestros de París y Oxford admitieron que las leyes de la naturaleza ciertamente se oponían a la producción de un espacio vacío, pero que la realización de tal espacio no es, de suyo, contraria a la razón. Así, sin ningún absurdo, uno podía argüir sobre el vacío y el movimiento en el vacío. A continuación, a fin de que esos argumentos pudieran ser legitimados, era necesario crear esa rama de la ciencia mecánica conocida como la dinámica.

El movimiento de La Tierra – Oresme. Los *Artículos de París* tuvieron aproximadamente el mismo valor tanto para apoyar la cuestión del movimiento de La Tierra, como para alentar el progreso de la dinámica mediante la concepción del vacío como algo concebible.

Aristóteles mantuvo que el primer cielo (el firmamento) se movía con un movimiento rotativo uniforme y que la Tierra era absolutamente estacionaria; y, como estas dos proposiciones se obtenían necesariamente de los primeros principios relativos al tiempo y el espacio, habría sido absurdo negarlas. No obstante, al declarar que Dios pudo otorgar al mundo movimiento rectilíneo, los teólogos de la Sorbona reconocieron que ninguna de estas dos proposiciones aristotélicas podía imponerse como necesidad lógica. Entonces, mientras continuaban admitiendo, como un hecho, que la Tierra era inmóvil y que los cielos se movían con movimiento de rotación diaria, Richard de Middletown y Duns Scoto (cerca de 1275-1308) empezaron a formular hipótesis en el sentido de que estos cuerpos fueran animados por otros movimientos y toda la Escuela de París adoptó la misma opinión. Pronto, entonces, el movimiento de la Tierra fue enseñado en la Escuela de París, no como una posibilidad, sino como una realidad. De hecho, procediendo a partir de cierta información provista por Aristóteles y Simplicio, se formuló un principio que por tres siglos iba a jugar un papel muy importante en la estática, esto es, que todo cuerpo pesado tiende a unir su centro de gravedad al centro de la Tierra.

Cuando estaba escribiendo sus *Cuestiones* sobre el *De Caelo* de Aristóteles, en 1368, Alberto de Helmstadt (o de Sajonia) admitió este principio, el cual aplicó a toda la masa de los elementos terrestres. El centro de gravedad de esta masa está constantemente inclinado a ubicarse en el centro del universo, pero, dentro de la masa terrestre, la posición del centro de gravedad está cambiando incesantemente. La causa principal de esta variación es la erosión producida por las corrientes y los ríos que continuamente desgastan la superficie del terreno, haciendo más profundos sus valles y cargando toda la materia suelta al fondo del océano, produciendo así un desplazamiento del peso que conlleva un incesante cambio en la posición del centro de gravedad. Ahora, en orden a reemplazar este centro de gravedad en el centro del universo, La Tierra se mueve sin parar; y, mientras tanto, un intercambio, lento pero perpetuo, se va efectuando entre los océanos y los continentes. Alberto de Sajonia se aventuró a pensar que estos movimientos pequeños e incesantes de La Tierra podían explicar los fenómenos de la precesión de los equinoccios. El mismo autor declaró que uno de sus maestros, cuyo nombre no reveló, anunció que era favorable a la rotación diaria de la Tierra, en tanto que refutó los argumentos que se oponían a este movimiento. Este maestro anónimo tuvo un discípulo completamente convencido en Nicolás de Oresme quien, en 1377, siendo canónigo de Rouen, y luego obispo de Lisieux, escribió un comentario en francés del tratado *De Caelo* de Aristóteles, sosteniendo con casi tanta fuerza como claridad que ni el experimento ni el argumento podían determinar si el movimiento diario pertenecía al firmamento de las estrellas fijas o a la Tierra. Él también mostró cómo interpretar las dificultades en «las Sagradas Escrituras en las que se afirma que el Sol gira, etc. Podría suponerse aquí que la sagrada Escritura se adapta al modo común del discurso humano, como también sucede en varios lugares, por ejemplo, en los que se escribe que Dios se arrepintió y estaba enfadado y se calmó y así sucesivamente, todo lo cual no ha de tomarse, no obstante, en estricto sentido literal». Finalmente, Oresme ofrece varias consideraciones favorables a la hipótesis del movimiento diario de La Tierra. En orden a refutar una de las objeciones puestas por los peripatéticos contra este punto, Oresme fue llevado a explicar cómo, en lugar de este movimiento, los cuerpos pesados parecían caer en línea vertical; él admitió que su movimiento real se componía de una caída por la línea vertical y una rotación diurna idéntica a aquélla que tendrían si estuvieran adheridos a la Tierra. Éste es precisamente el principio al que Galileo se iba a volver más tarde.

Pluralidad de mundos. Aristóteles mantuvo que la existencia simultánea de varios mundos era un absurdo, para lo que su argumento principal era sacado de su teoría de la gravedad, de donde él concluyó que dos mundos distintos no podían coexistir y ser cada uno rodeado por sus elementos; por lo que sería ridículo comparar cada

uno de los planetas a una Tierra similar a la nuestra. En 1277, los teólogos de París condenaron esta doctrina como una negación de la omnipotencia divina; Richard de Middletown y Enrique de Gante (quien escribió cerca de 1280), Guillaume Varon (quien escribió un comentario sobre *Las sentencias*, alrededor de 1300) y, hacia 1320, Jean de Bassols, Guillermo de Ockham (m. luego de 1347) y Walter Burley (m. alrededor de 1348) no dudaron en declarar que Dios podía crear otros mundos similares al nuestro. Esta doctrina, adoptada por varios maestros parisinos, exigía que la teoría de la gravedad y el lugar natural desarrollada por Aristóteles fuera totalmente cambiada; de hecho, se la sustituyó por la siguiente teoría. Si alguna parte de los elementos que forman un mundo es despegada del mismo y llevada lejos, su tendencia será a moverse hacia el mundo al que pertenece y del que fue separada; los elementos de cada mundo están inclinados a disponerse de tal modo que el más pesado estará en el centro y el más liviano en la superficie. Esta teoría de la gravedad apareció en Juan Buridán de Béthune, quien se convirtió en rector de París en 1327, enseñando en esa institución hasta más o menos 1360; y, en 1377, esta misma teoría fue formalmente propuesta por Oresme. También estaba destinada a ser adoptada por Copérnico y sus primeros seguidores y a ser mantenida por Galileo, William Gilbert y Otto von Guericke. […]

Pasó un siglo entre las condenaciones pronunciadas por Etienne Tempier (1277) y la edición del *Traité du Ciel et du Monde* de Nicolás de Oresme (1377) y, dentro de ese tiempo, todos los principios esenciales de la física de Aristóteles fueron socavados y las grandes ideas que controlan la ciencia moderna fueron formuladas. Esta revolución fue principalmente el trabajo de franciscanos de Oxford, como Richard de Middletown, Duns Scoto y Guillermo de Ockham, y de maestros de la Escuela de París, herederos de la tradición inaugurada por estos franciscanos; entre los maestros parisinos, Buridán, Alberto de Sajonia y Oresme, estaban en los rangos de vanguardia".

5º Newton y la ley de gravitación universal

Sigamos la narración de P. Duheim. "*La revolución copernicana*. Aunque dirigidos por tendencias diametralmente opuestas al verdadero espíritu científico, los esfuerzos hechos por los averroístas de restaurar la astronomía de las esferas concéntricas fueron quizás un estímulo al progreso de la ciencia, en cuanto acostumbraron a los físicos al pensamiento de que el sistema ptolemaico no era la única doctrina astronómica posible, o aún la mejor que podía desearse. Así, a su manera, los averroístas pavimentaron el camino para la revolución copernicana. Los movimientos que presagiaban esta revolución eran manifiestos a mediados del siglo XV, en los escritos de Nicolás de Cusa y al principio del siglo XVI en las notas de Da Vinci, siendo versados en la física de París ambos eminentes científicos.

Celio Calcagnini propuso, a su vez, explicar el movimiento diario de los planetas atribuyendo a la Tierra una rotación del oeste al este, completa en un día sideral. Su estudio, *Quod celum stet, terra vero moveatur*, aunque parece haber sido escrito alrededor de 1530, no fue publicado sino hasta 1544, cuando apareció en una edición póstuma de las obras del autor. Calcagnini declaró que la Tierra, originalmente en equilibrio en el centro del universo, recibió un primer impulso que le impartió un movimiento rotatorio, y este movimiento, al cual nada se oponía, era preservado indefinidamente por virtud del principio asentado por Buridán y aceptado por Alberto de Sajonia y Nicolás de Cusa. De acuerdo con Calcagnini, la rotación diaria de la Tierra era acompañada por una oscilación que explica el movimiento de precesión de los equinoccios. Otra oscilación pone las aguas del mar en movimiento y determina los flujos y reflujos de las mareas. Esta última hipótesis iba a ser mantenida por Andrea Cesalpino (1519-1603) en sus *Quaestiones peripateticae* (1569) y a inspirar a Galileo, quien, desafortunadamente, iba a buscar en los fenómenos de las mareas su prueba favorita de la rotación de la Tierra.

El *De revolutionibus orbium celestium libri sex* fue imprimido en 1543, unos pocos meses antes de la muerte de Copérnico (1473-1543), pero los principios del sistema astronómico propuesto por este hombre de genio habían sido publicados en la temprana fecha de 1539 en la *Narratio prima*, de su discípulo Joachim Rheticus (1514-1576). Copérnico se adhirió a la antigua hipótesis astronómica que pretendía que el mundo era esférico y limitado; y que todos los movimientos celestes podían descomponerse en movimientos circulares y uniformes; pero sostuvo que el firmamento de estrellas fijas era inmóvil, lo mismo que el Sol, al cual emplazó en el centro de este firmamento. Le atribuyó tres movimientos a la Tierra: un movimiento circular por el que el centro de la Tierra describía un círculo con velocidad uniforme, situado en el plano de la eclíptica y excéntrico respecto del Sol. Una rotación diaria sobre el eje inclinado hacia la eclíptica. Y, finalmente, una rotación de este eje alrededor de un eje normal a la eclíptica y que pasa a través del centro de la Tierra. El tiempo empleado por esta última rotación era un poco más largo que el requerido para el movimiento circular del centro de la Tierra, el cual producía el fenómeno de la precesión de los equinoccios. A los cinco planetas, Copérnico les adscribía movimientos análogos a aquellos de los que la Tierra estaba provista; y mantuvo que la Luna se movía en círculo alrededor de la Tierra.

De las hipótesis copernicanas, la más nueva era aquélla de acuerdo con la cual la Tierra se movía en círculos alrededor del Sol. Desde los días de Aristarco de Samos y Seleuco, nadie había adoptado esta visión. Los astrónomos medievales la habían rechazado, porque suponían que las estrellas estaban demasiado cerca de la Tierra y el Sol; y ese movimiento circular anual de la Tierra podría dar a las estrellas un paralaje perceptible. Mas, por otro lado, hemos visto que varios autores habían propuesto atribuir a la Tierra uno u otro de los dos movimientos que Copérnico añadía al movimiento anual. Para defender la hipótesis del movimiento diario de la Tierra contra las objeciones formuladas por los físicos peripatéticos, Copérnico invocó exactamente las mismas razones que Oresme; y, en orden a explicar cómo retiene las varias partes de sus elementos cada planeta, él adoptó la teoría de la gravedad propuesta por el eminente maestro. Copérnico se mostró como un adherente de la física parisina aún en la siguiente opinión, enunciada accidentalmente: la aceleración de la caída de los cuerpos pesados se explica por el continuo crecimiento del ímpetu que recibe de la gravedad. […]

Los enemigos de la filosofía aristotélica adoptaron alegremente el sistema de Copérnico, considerando sus hipótesis como otras tantas proposiciones físicamente correctas. Éste fue el caso de Pierre de La Ramée, llamado Petrus Ramus (1502-1572), y, especialmente, Giordano Bruno (alrededor de 1550-1600). La física desarrollada por Bruno, en la que incorporó la hipótesis copernicana, procedía de Nicolás de Oresme y Nicolás de Cusa, pero, principalmente, de la física enseñada en la Universidad de París en el siglo XIV. La extensión infinita del universo y la pluralidad de mundos fueron admitidas como posibles por muchos teólogos al final del siglo XIII; y la teoría del movimiento lento, que causa que las porciones centrales de la Tierra se muevan hacia la superficie habían sido enseñadas por Alberto de Sajonia antes que atrajeran la atención de Da Vinci. La solución de los argumentos peripatéticos contra el movimiento de la Tierra y la teoría de la gravedad propuesta a causa de la comparación de los planetas con la Tierra parecía ser tomada por Bruno de Oresme. La apostasía y las herejías por las que Bruno fuera condenado en 1600 no tenían nada que ver con las doctrinas físicas que él había hecho suyas, las cuales incluían, en particular, a la astronomía copernicana. De hecho, no parece que, en el siglo XVI, la Iglesia manifestara la más mínima ansiedad concerniente al sistema de Copérnico. […]

Intentos iniciales en la mecánica celeste – Gilbert – Kepler. Copérnico se había esforzado en describir con exactitud el movimiento de cada uno de los cuerpos celestes; y Galileo había bregado para extender a las estrellas lo que se sabía de la dinámica de los movimientos sublunares o determinar las fuerzas que sustentan los movimientos celestes. Ellos se contentaron con sostener que la rotación diaria de la Tierra se perpetúa por virtud de un ímpetu dado de una vez y para siempre; que las varias partes de un elemento perteneciente a una estrella tienden hacia el centro de esta estrella por razón de la gravedad peculiar a cada uno de los cuerpos celestes por la cual el cuerpo está capacitado para preservar su integridad. Así, en mecánica celeste, estos dos grandes científicos contribuyeron magramente a lo que ya habían enseñado Buridán, Oresme y Nicolás de Cusa. Por el tiempo de Galileo, descubrimos los primeros intentos de constituir una mecánica celeste, es decir, de explicar el movimiento de las estrellas mediante la ayuda de fuerzas análogas a aquéllas cuyos efectos sentimos sobre la Tierra; los más importantes de estos intentos iniciales fueron hechos por William Gilbert (1540-1603) y Johann Kepler (1571-1631).

A Gilbert le debemos un tratado exhaustivo sobre magnetismo, en el cual incorporó sistemáticamente lo que fue conocido en tiempos medievales sobre fenómenos eléctricos y magnéticos, sin añadir nada muy esencial; él también dio los resultados de sus propios y valiosos experimentos. Fue en este tratado que él empezó a exponer su *Filosofía Magnética*, es decir, su mecánica celeste, pero el trabajo en el que la desarrolló completamente no fue publicado sino hasta 1651, mucho después de su muerte. Como Oresme y Copérnico, Gilbert mantuvo que en cada estrella había una gravedad particular por de la cual las partes materiales que pertenecen a la estrella y a ella sola tendían a reunirse a la estrella, cuando se habían separado de ella. Él comparó esta gravedad, peculiar a cada estrella, a la acción por la cual un pedazo de hierro vuela hacia un imán cuya naturaleza el hierro comparte. […]

Kepler mismo admitió que en estos primeros tanteos sobre la línea de la mecánica celeste él estaba bajo la influencia de Nicolás de Cusa y de Gilbert. Inspirado por el primero de estos autores, atribuyó la rotación de la Tierra sobre su eje a un ímpetu comunicado por el Creador al principio del tiempo; pero, bajo la influencia de la teoría de Gilbert, declaró que este ímpetu terminaba por ser transformada en un alma o un principio de animación. En el sistema más temprano de Kepler, como en el de Gilbert, se decía que el distante Sol ejerce un poder perpendicular al radio vector sobre cada planeta, el cual poder producía el movimiento circular del planeta. Sin embargo, Kepler tuvo el feliz pensamiento de proponer una atracción universal en lugar de la atracción magnética que Gilbert había considerado como peculiar a cada estrella. Él asumió que cada masa material tendía hacia toda otra masa material, sin importar a qué cuerpo celeste perteneciera cada una de ellas; que una porción de materia ubicada entre dos estrellas tendería hacia la más grande y más cercana, aunque podría no haber pertenecido nunca a la

misma; que, al momento de la marea alta, las aguas del mar subían hacia la Luna, no porque ellas tuvieran una especial afinidad con esta estrella húmeda, sino por virtud de la tendencia general que hace que todas las masas materiales se atraigan cada una a las demás.

En el curso de numerosos intentos de explicar el movimiento de las estrellas, Kepler fue llevado a complicar su primera mecánica celeste. Él asumió que todos los cuerpos celestes estaban inmersos en un fluido etéreo, que la rotación del Sol engendraba un vórtice dentro de este fluido, cuyas reacciones se interponían para desviar a cada planeta del camino circular. También pensó que cierto poder, similar a aquél que dirige la aguja magnética, preservaba invariable en el espacio la dirección del eje alrededor del cual la rotación de cada planeta es efectuada. El sistema inestable y complicado de mecánica celeste enseñado por Kepler manó de una muy deficiente dinámica que, en muchos puntos, era más afín a la de los peripatéticos que a la de los parisinos. Sin embargo, estas muchas hipótesis vagas ejercieron una incontestable influencia en las tentativas de los científicos, de Kepler a Newton, para determinar las fuerzas que mueven a las estrellas. Si, en efecto, Kepler preparó el camino para el trabajo de Newton, fue principalmente por el descubrimiento de las tres admirables leyes que inmortalizaron su nombre; y, por la enseñanza de que los planetas describen elipses en lugar de círculos, él produjo en la astronomía una revolución, por mucho, más grande que la causada por Copérnico; él destruyó el último venerable principio de la física antigua, de acuerdo con el cual todos los movimientos celestes eran reductibles al movimiento circular. […]

La obra de Newton. La mayoría de las verdades dinámicas se descubrieron entre el tiempo de Galileo y Descartes y el de Huygens y Leibniz. La ciencia de la dinámica requería de un Euclides que la organizara como la geometría había sido organizada y este Euclides apareció en la persona de Isaac Newton (1642-1727), quien, en sus *Philosophiae naturalis principia mathematica*, publicado en 1687, dedujo con éxito la integridad de la ciencia del movimiento, con tres postulados: la inercia; la independencia de los efectos de fuerzas y movimientos previamente adquiridos; y la igualdad de la acción y la reacción. Si los *Principia* de Newton no hubieran contenido nada más que esta coordinación de la dinámica en un sistema lógico, habrían constituido, no obstante, una de las más importantes obras nunca escritas; pero, además, ellos dieron la más grande aplicación posible de esta dinámica al utilizarla para el establecimiento de la mecánica celeste. En efecto, Newton mostró con éxito que las leyes de los cuerpos en caída libre en la superficie de la Tierra, las leyes que presiden sobre el movimiento de los planetas alrededor del Sol y los satélites alrededor de los planetas que acompañan y, finalmente, las leyes que gobiernan la forma de la Tierra y de otras estrellas, así como el nivel de las mareas, no son sino corolarios de esta única hipótesis universal: *dos cuerpos, cualquiera que sea su origen y naturaleza, ejercen cada uno sobre el otro una atracción proporcional al producto de sus masas y en proporción inversa al cuadrado de la distancia que los separa*.

El principio dominante de la física antigua declaraba la distinción esencial entre las leyes que dirigían el movimiento de las estrellas – las cuales estaban exentas de generación, cambio y corrupción – y las leyes que presiden los movimientos de los cuerpos sublunares, sujetos a generación y corrupción. Desde el nacimiento de la física cristiana y, especialmente, desde el final del siglo XIII, los físicos habían estado esforzándose por destruir la autoridad de este principio y por presentar a los mundos celeste y sublunar como sometidos a las mismas leyes: la doctrina de la gravitación universal era el resultado de este prolongado esfuerzo. En proporción, a medida que el tiempo se acercaba, cuando Newton iba a producir su sistema, los esfuerzos para formar una cosmología se multiplicaron, de modo que su descubrimiento tuvo un buen número de predecesores. Cuando, en 1672, Guericke tomó de nuevo la mecánica celeste de Kepler, no le hizo sino una enmienda, la cual, desafortunadamente, causó la desaparición de la única proposición por la que este trabajo llevó a los descubrimientos de Newton. Kepler había mantenido que dos masas materiales de cualquier tipo se atraen entre sí, pero, a imitación de Copérnico, Gilbert y Galileo, Guericke limitó esta atracción mutua a las partes de la misma estrella, de modo que, lejos de ser atraídos por la Tierra, porciones de la Luna serían repelidas de la Tierra si se colocaran sobre su superficie. Pero, en 1644, bajo el pseudónimo de Aristarco de Samos, Roberval publicó un sistema de mecánica celeste, en el que la atracción era quizás mutua entre dos masas sin importar de qué tipo; en el que, a todo evento, la Tierra y Júpiter atraían a sus satélites con un poder idéntico a la gravedad de la que ellos dotan a sus propios fragmentos.

En 1665, bajo la pretensión de explicar los movimientos de los satélites de Júpiter, Giovanni Alfonso Borelli (1608-79) trató de avanzar una teoría que simultáneamente abarcaba los movimientos de los planetas alrededor del Sol y de los satélites alrededor de los planetas. Él fue el primero de los científicos modernos (habiendo sido precedido por Plutarco en este punto) en sostener la opinión de que la atracción que causa que un planeta tienda hacia el Sol y un satélite hacia la estrella que acompaña, está en equilibrio con la fuerza centrífuga producida por el movimiento circular del planeta o satélite en cuestión. En 1674, Robert Hooke (1635-1702) formuló la misma idea con gran precisión. Habiendo ya supuesto que la atracción de dos masas varía inversamente al cuadrado

de sus distancias, él estaba en posesión de las hipótesis fundamentales de la teoría de la gravitación universal, las cuales hipótesis fueron sostenidas por Wren hacia el mismo tiempo. Sin embargo, ninguno de estos científicos fue capaz de deducir la mecánica celeste de todos estos hallazgos y principios, puesto que todos estaban desprovistos de un conocimiento adecuado de las leyes de la fuerza centrífuga, publicado en esta época por Huygens. En 1684, Edmund Halley (1656-1742) luchó para combinar las teorías de Huygens con las hipótesis de Hooke, pero, antes que terminara su trabajo, Newton presentó sus *Principia* a la *Royal Society*, habiendo estado meditando silenciosamente por 20 años sobre su sistema del mundo. Halley, quien no pudo anticipar o impedir la salida de Newton, tuvo la gloria de ampliar el dominio de la gravitación universal haciendo que incluyera a los cometas (1705). […]

El progreso general de la mecánica celeste y general en el siglo XVIII. Muchos siguieron el camino delineado por Newton y trataron de extender el campo de la mecánica general y de la celeste, pero hubo tres que parecieron sobrepasar a todos los demás: Alexis-Claude Clairaut (1713-65), Jean- Baptiste Rond d'Alembert (1717-1783) y Leonhard Euler (1707-83). […] Clairaut extendió las consecuencias de la atracción universal en todas direcciones y, en 1743, las ecuaciones de la hidrostática que había establecido le permitieron perfeccionar la teoría de la figura de la Tierra. En 1752, publicó su teoría de las desigualdades lunares, de las que, en un principio, él había desesperado de poder explicar mediante los principios de Newton. Los métodos que diseñó para el estudio de las perturbaciones que los planetas producen en el camino de una estrella le permitieron anunciar, en 1758, la exactitud del tiempo de regreso del cometa Halley. La confirmación de esta predicción, en la que Clairaut había recibido la ayuda de Lalande (1732-1807) y de Madame Lepaute, ambos matemáticos capaces, puso fuera de dudas la aplicación de las hipótesis de Newton a los cometas.

Por más que fueran grandes los logros de Clairaut en perfeccionar el sistema de atracción universal, no fueron tan importantes como los de d'Alembert. Newton no pudo deducir de sus suposiciones una teoría satisfactoria de la precesión de los equinoccios y este fracaso manchó la armonía de la doctrina de la gravitación universal. En 1749, d'Alembert dedujo, de la hipótesis de la gravitación, la explicación de la precesión de los equinoccios y la mutación del eje de la Tierra; y, poco después, Euler, tomando de los admirables recursos de su genio matemático, hizo ulteriores mejoras sobre la base del descubrimiento de d'Alembert.

Clairaut, d'Alembert y Euler fueron las estrellas más brillantes de una entera constelación de teóricos y astrónomos mecánicos; y a este grupo sucedió otro, en el que brillaron dos hombres de inteligencia superior, Joseph-Louis Lagrange (1736-1813) y Pierre-Simon Laplace (1749-1827). Se dice que Laplace nació para completar la mecánica celeste, si, en efecto, estuviera en la naturaleza de una ciencia el admitir su completo acabado; y se puede decir casi lo mismo de Lagrange con relación a la mecánica general. En 1787, Lagrange publicó la primera edición de su *Mecanique analytique*; la segunda, que fue grandemente aumentada, se publicó luego de la muerte del autor[1]. La *Mecanique céleste*, de Laplace, fue publicada de 1799 a 1805 y estos trabajos dan una explicación de la mayor parte de las conquistas mecánicas hechas en el curso del siglo XVIII, con la ayuda de los principios que Newton había establecido a la mecánica general y las leyes que había impuesto sobre la gravitación universal[2]. No obstante cuán exhaustivos y efectivos sean estos trabajos, ellos no incluyen, de ningún modo, todos los descubrimientos en la mecánica general y celeste por los que estamos en deuda con sus autores. Para hacerle aunque sea una magra justicia a Lagrange, sus competentes investigaciones deberían ponerse a la par de su *Mecanique analytique*".

---

[1] Enc. *Encarta*: "Joseph Louis Lagrange (1736-1813), matemático y astrónomo francés nacido en Turín (Italia), en cuya universidad estudió. Fue nombrado profesor de geometría en la Academia Militar de Turín a los 19 años y en 1758 fundó una sociedad que más tarde se convertiría en la Academia de Ciencias de Turín. En 1766 fue nombrado director de la Academia de Ciencias de Berlín, y 20 años después llegó a París invitado por el rey Luis XVI. Durante el periodo de la Revolución Francesa, estuvo al cargo de la comisión para el establecimiento de un nuevo sistema de pesos y medidas (*véase* Sistema métrico decimal). Después de la Revolución, fue profesor de la nueva École Normale y con Napoleón fue miembro del Senado y recibió el título de conde. Fue uno de los matemáticos más importantes del siglo XVIII; creó el cálculo de variaciones, sistematizó el campo de las ecuaciones diferenciales y trabajó en la teoría de números. Entre sus investigaciones en astronomía destacan los cálculos de la libración de la Luna y los movimientos de los planetas. Su obra más importante es *Mecánica analítica* (1788)".

[2] Enc. *Encarta*: "Pierre Simon Laplace (1749-1827), astrónomo y matemático francés, conocido por haber aplicado con éxito la teoría de la gravitación de Newton a los movimientos planetarios en el Sistema Solar. Nació en Normandía y estudió en la Escuela Militar de Beaumont. En 1767 fue profesor de matemáticas en la Escuela Militar de París y en 1785 fue elegido miembro de la Academia de Ciencias Francesa. Laplace realizó su trabajo más importante al desarrollar el análisis matemático del sistema de astronomía gravitacional elaborado por el matemático, físico y astrónomo británico Isaac Newton. Demostró que los movimientos planetarios son estables y que las perturbaciones producidas por la influencia mutua de los planetas o por cuerpos externos, como los cometas, solamente son temporales. Trató de dar una teoría racional del origen del Sistema Solar en su hipótesis nebular de la evolución estelar (*véase* Cosmología). En *Mecánica celeste* (5 volúmenes, 1799-1825) Laplace sistematizó toda la obra matemática que se había realizado sobre la gravitación. *Exposición del sistema del mundo* (1796) contiene un resumen de la historia de la astronomía. También trabajó sobre la teoría de la probabilidad en su *Teoría analítica de las probabilidades* (1812) y en *Ensayo filosófico sobre la probabilidad* (1814)".

6º Teología de la gravedad

Para un espíritu tradicional, que advierte que lo que recibe de los antiguos es mucho más que lo que aportan los modernos, y que, por consiguiente, en cuanto a las ciencias se considera aristotélico y tomista, esta unificación de la mecánica celeste y terrestre, alcanzada principalmente por la universalización de la ley de gravedad, puede parecerle como una profanación de los cielos y una especie de laicización del cosmos. Más todavía cuando ve que se ha alcanzado siguiendo la línea del nominalismo de Ockham y de la tendencia antiaristotélica de la decadente Universidad de París de los siglos XIV y XV.

Pero no habría nada más antiaristotélico que una Física aferrada a sus ideas y alejada de la experiencia. Es verdad que Aristóteles se habría asombrado en extremo si hubiera podido observar por telescopio una erupción solar o la explosión de una estrella, pero siempre estuvo dispuesto a aprender de la naturaleza y nunca pretendió enseñarle a ella cómo se debía comportar, lo que ciertamente hacen los evolucionistas en la actualidad. La visión platónica del mundo de las Ideas era extremadamente bella, y con no pocos reflejos de verdad, pero Aristóteles no dudó en desecharla por docilidad a la realidad.

El espíritu de profanación y laicidad no está en lo que la experiencia muestra ni en la verdadera ciencia, sino en el alma enferma de la mayoría de los científicos, que pretenden cerrar todas las vías que se abren de la Física a la Metafísica y Teología. Aristóteles no dejaba de ver en toda forma, hasta en la más simple, un destello de la divina inteligencia. Toda la realidad es sagrada, y la inmensidad del cosmos que nos descubren los instrumentos modernos no es menos asombrosa ni habla menos de Dios que lo que veían los antiguos ojos.

Cómo no ver en la ley de la gravitación una primera expresión del *amor universal por la unidad* que necesariamente se imprime en la creación como reflejo y huella del Creador, que es Uno y es Amor. Es la primera realización de la ley que ya observaba el Sabio: "Todos los animales aman a los de su especie, y todo hombre ama a su prójimo. Todos los animales se unen con los de su especie, y todo hombre se une a su semejante" (Eclesiástico 13, 15-16). Todo cuerpo tiende a unirse con todo cuerpo, y mientras mayor corporeidad tiene, atrae con mayor fuerza a los demás.

7º El fenómeno de la gravitación universal

Aprovechando las precisas mediciones de Tycho Brahe, Kepler estableció tres relaciones matemáticas acerca del movimiento de los planetas:

- La órbita de cada planeta no es un círculo sino una elipse que tiene al Sol en uno de sus focos, aunque de hecho son elipses muy cercanas a la forma circular.
- Una línea imaginaria del Sol a un planeta en movimiento barre áreas iguales en tiempos iguales, de manera que cuando el planeta va más cerca del Sol se mueve más rápido.
- El período de revolución de cada planeta en torno al Sol guarda una cierta relación constante con su distancia media al Sol que viene expresada por la ecuación: $\frac{T^2}{R^3} = k$ donde T es el período, R es el radio promedio y k una misma constante para todos los planetas.

Figura 5.15
Diagrama de las tres leyes de Kepler del movimiento de los planetas. La elipse ha sido exagerada de modo que tiene una excentricidad mucho mayor que cualquier órbita planetaria real. Note que de acuerdo con la primera ley de Kepler, el Sol está localizado en uno de los focos, *F*. De acuerdo con la segunda ley de Kepler, el tiempo que le toma al planeta moverse de *A* a *B* y de *C* a *D* es el mismo si las áreas de las cuñas *ABS* y *CDS* son las mismas. La tercera ley de Kepler establece que la relación del periodo orbital *T* al cuadrado y el cubo del radio medio *R* es la misma para todos los planetas.

Newton aceptó el desafío que suponían estas observaciones y, fundado en sus propios principios y poderosamente armado de su habilidad matemática, pudo descubrir la simple ley de la gravedad, que daba perfecta razón de las complejas relaciones de Kepler. Según su primera ley de la dinámica, los planetas tienen un impulso o momento tangencial a su órbita que se conserva por inercia. Si no siguen en línea recta, es porque sufren una aceleración centrípeta que los curva. Newton estaba en condiciones de sospechar qué relación guardaba la aceleración centrípeta con la distancia. Vimos en cinemática que la aceleración centrípeta en el movimiento circular uniforme responde a la ecuación: $a_c = \frac{v^2}{R}$ Como la velocidad puede calcularse en razón del período del movimiento: $v = \frac{2\pi R}{T}$ de allí podemos relacionar la aceleración gravitatoria con el período: $a_g = \frac{4\pi^2 R}{T^2}$ Para cumplir con la tercera ley de Kepler, no hay más que suponer que la aceleración es inversamente

proporcional al cuadrado de la distancia al centro de órbita[1]: $a \propto \frac{1}{R^2}$ porque de allí se sigue: $\frac{1}{R^2} \propto \frac{4\pi^2 R}{T^2} \rightarrow \frac{T^2}{R^3} \propto 4\pi^2$

Es claro que esto se dice para un movimiento perfectamente circular. Pero con mucho mayor esfuerzo matemático, se puede mostrar que, cuando la aceleración centrípeta es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia a un centro, si la velocidad tangencial es mayor que la debida para un movimiento perfectamente circular, el móvil describe una elipse con centro en el foco más cercano, y si la velocidad tangencial es menor, describe también una elipse con centro en el foco más lejano. Y en estos movimientos puede comprobarse que la velocidad es mayor mientras más cerca del centro de aceleración, y menor mientras más lejos, cumpliendo la segunda ley de Kepler.

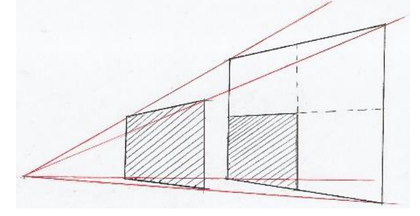
Lo curioso de todo esto es que, como vemos, no estamos teniendo en cuenta para nada la masa de los cuerpos. Así como no importa qué masa tienen los cuerpos sobre la superficie de la Tierra, pues todos sufren la misma aceleración y caen a la misma velocidad, como había mostrado Galileo, así tampoco nos está importando qué masa tienen los planetas, que de hecho es tan diversa, como ya ocurría en la tercera ley de Kepler, que relaciona período y radio sin importar la masa. Ya sea un enorme planeta, ya sea un asteroide de un kilogramo, si ambos están a la misma distancia del Sol, sufren la misma aceleración centrípeta y, a igual velocidad tangencial, giran de la misma manera. Así vemos que pasa con Júpiter (que tiene 317,8 veces más masa que la tierra) y los 63 satélites que lo rodean.

Ahora bien, Newton estaba convencido que, según su segunda ley, una aceleración responde a una fuerza aplicada. Había que hablar entonces de una fuerza de gravedad, con la misma dirección radial de la aceleración, que explicara la curvatura de las órbitas. Pero como las fuerzas aplicadas deben ser también proporcionales a las masas de los cuerpos que se aceleran, según la ecuación: $F = ma$ y aquí resulta que las aceleraciones no dependen de las masas, debería tenerse en cuenta que, a masa mayor, la fuerza aplicada fuera mayor, de modo que se cumpliera: $a = \frac{F}{m} = constante$ Esto, en realidad, es una debilidad de la explicación de Newton (aunque no de sus ecuaciones), como luego mostraremos mejor, porque aparece como causa explicativa lo que debe considerarse más bien como consecuencia. El fenómeno gravitatorio se muestra independiente de las masas de los cuerpos atraídos, pero Newton nos las hace tener en cuenta para anular inmediatamente sus efectos por una fuerza proporcional a ellas. Tengamos presente que lo que propiamente se observa en la gravitación, es una aceleración centrípeta independiente de la masa.

En lo que Newton tuvo un gran acierto, en cambio, además del mencionado sobre la relación aceleración-distancia, fue en señalar que la aceleración gravitatoria depende de la masa del cuerpo hacia el que se acelera: $a_g \propto M$ Cada cuerpo provoca en torno a sí una atracción de todo otro cuerpo, independientemente de su masa, de tal manera que lo acelera hacia sí en proporción directa a su propia masa y en proporción inversa al cuadrado de la distancia: $a_g \propto \frac{M}{R^2} \rightarrow \frac{a_g R^2}{M} = G$ Donde G es la *constante de la gravitación universal*, cuyo valor debe hallarse experimentalmente, y cambia para cada sistema de unidades. En el Sistema Internacional, G viene dado en $\frac{m^3}{kg\ sg^2}$ (donde se nota la relación constante del cubo de la distancia con el cuadrado del tiempo que plantea la tercera ley de Kepler). Es interesante observar que en G se relacionan de manera bastante simple las magnitudes fundamentales de la Física: el espacio (m^3), la masa (kg) y el tiempo (sg). La relación masa/espacio es unidad de densidad, y el cuadrado del tiempo tiene que ver con la aceleración. Si se hace intervenir la fuerza en la ecuación de la gravedad, como hizo Newton, hay que tener en cuenta que $a = \frac{F}{m}$ y que la fuerza se mide en Newton (N), por lo que puede decirse también que las unidades de G son $\frac{N\ m^2}{kg^2}$ Desde que Henry Cavendish determinó la densidad de la tierra, pudo hallarse el valor de esta constante, que en el SI es: $G = 6{,}673\ 10^{-11} \frac{m^3}{kg\ sg^2}$ Como se ve, es muy pequeño, por lo que la gravedad no se pone de manifiesto sino para masas muy grandes. Es ciertamente maravilloso que, como se ha podido comprobar, con tan simple relación se explican en minucioso detalle los movimientos de las cosas en la Tierra, las órbitas de los planetas en torno al Sol, el movimiento de los satélites naturales de los diversos planetas, y se han podido dirigir los acercamientos y descendimientos de los diversos aparatos que el hombre ha enviado a los cuerpos celestes cercanos.

[1] Como vimos más arriba al considerar la rotación de la tierra (cf. «La rotación de la tierra», p. 72), conociendo el período de la Luna y su distancia a la Tierra, así como el radio de la Tierra, Newton podía comprobar que de hecho la gravedad de la Tierra disminuía con el cuadrado de la distancia.

La relación es ciertamente simple y fundamental. Las aceleraciones son magnitudes fáciles de observar y medir. La masa muestra ser una cualidad primera de todo cuerpo natural. Y la relación con la distancia es simplemente geométrica, pues no es más que la manera como disminuye cualquier irradiación rectilínea con la distancia. Si de un centro se despiden rayos de lo que sea: flujo de luz, de calor, de partículas (electrones, piedras, zapatos, lo que se quiera), su densidad disminuye – por cuestión geométrica – con el cuadrado de la distancia. Porque la superficie de un cono de irradiación crece con el cuadrado de la distancia, por lo que la misma superficie a doble distancia, recibe la cuarta parte de líneas de irradiación. Nada más normal ni esperable, por lo tanto, que la atracción de la gravedad disminuya en esta misma proporción.



8º Interacción gravitatoria entre múltiples los cuerpos

La realidad natural, sin embargo, se resiste a someterse a la simplicidad. Si todo cuerpo tiende a convertirse, por una innata soberbia, en centro de gravedad de todo lo que lo rodea, cuando un cuerpo atrae al que se le acerca, éste también tiende a atraerlo a aquél hacia su propio centro de gravedad. Es así que las relaciones entre egoístas se vuelven complejas.

En nuestra experiencia habitual de habitantes de la Tierra, la única atracción que notamos es la de nuestro planeta porque, debido a la pequeñez de G, la atracción del cuerpo, por ejemplo, de una persona es absolutamente insensible. A 1 m de distancia tenemos: $a_g = G\frac{m}{d^2} = 6{,}673\ 10^{-11} \times \frac{100\ kg}{1m^2} = 6{,}673\ 10^{-9}\frac{m}{sg^2}$ Es mil millones de veces inferior a la aceleración de la gravedad terrestre g. No es por gorda que una persona se vuelve atractiva. Aun en el caso de un cuerpo como la Luna, la gravedad que imprime en la Tierra es demasiado pequeña. La Luna tiene una masa equivalente a 1/81 veces la de la Tierra. Si, como calculamos más arriba, la gravedad con que la Tierra atrae la Luna es $2.72\ 10^{-3}\frac{m}{sg^2}$, la gravedad de la Luna sobre la tierra es $\frac{2.72}{81}10^{-3}\frac{m}{sg^2} = 3.36\ 10^{-5}\frac{m}{sg^2}$ Es más de cien mil veces inferior a g. Puede explicar el fenómeno de las mareas, pero no la podemos sentir.

Al tener que considerar la atracción gravitatoria mutua entre dos cuerpos, a los que llamaremos 1 y 2, parece volverse útil la expresión newtoniana de la ley de gravedad. Como señalamos, Newton no habla de la gravedad en términos de aceleración sino de fuerza, recurriendo a su segunda ley, por lo que tiene que hacer proporcional esta fuerza también a la masa del cuerpo acelerado por la gravedad: $\frac{F_2}{m_2} = G\frac{m_1}{R^2}$ Si ahora queremos considerar la atracción del cuerpo 2 sobre el 1, tendremos: $\frac{F_1}{m_1} = G\frac{m_2}{R^2}$ donde la distancia es la misma. Pero si despejamos F_1 y F_2, resulta que tienen la misma magnitud, aunque con sentido contrario: $F_1 = F_2 = G\frac{m_1 m_2}{R^2}$ Y Newton nos dice que aquí se está cumpliendo su tercera ley, según la cual todo cuerpo que aplica una fuerza sobre otro, sufre una fuerza reactiva de igual magnitud pero de sentido contrario. Si no se trata de dos cuerpos sino de muchos, se podría considerar el comportamiento debido a la sumatoria de las fuerzas gravitatorias mutuas entre uno y otro.

Todo esto merece ser considerado detenidamente. ¿Hay que pensar la gravedad como una fuerza que hace activamente un cuerpo sobre otro? ¿Quién es propiamente el agente de esta acción? Es evidente que existe el fenómeno que llamamos gravedad, pero antes de considerar su naturaleza con mayor precisión, hagamos unas últimas observaciones acerca de la fuerza gravitatoria.

9º Gravedad y geometría: campo gravitatorio

Michael Faraday

Michael Faraday, uno de los científicos más eminentes del siglo XIX, realizó importantes contribuciones a la física y la química. Descubrió el fenómeno conocido como inducción electromagnética al observar que en un cable que se mueve en un campo magnético aparece una corriente. Este descubrimiento contribuyó al desarrollo de las ecuaciones de Maxwell y llevó a la invención del generador eléctrico. Entre los anteriores trabajos de Faraday en química figuran el enunciado de las leyes de la electrólisis y el descubrimiento del benceno.



Michael Faraday desarrolló la noción de *campo* para la electricidad, pero que se aplica a la gravedad y a todos los fenómenos semejantes. El *campo* se entiende como una propiedad del espacio que rodea a un cuerpo con masa, electricidad, magnetismo, o influencias semejantes. El *campo gravitatorio*, en particular, se describe por cierta intensidad vectorial, que equivale a la fuerza por unidad de masa, medida en una masa de prueba muy pequeña por relación a la masa que provoca el campo, de modo que pueda despreciarse la variación del campo que pudiera introducir la masa de prueba. La intensidad de campo así medida no es otra cosa que la aceleración que en cada punto del espacio provoca la masa del cuerpo o cuerpos presentes. Si llamamos Γ (gamma mayúscula)

a la intensidad del campo gravitatorio, m_0 a la masa de prueba, M a la masa (puntual) cuyo campo se mide y r a la distancia al centro de masa, tenemos:
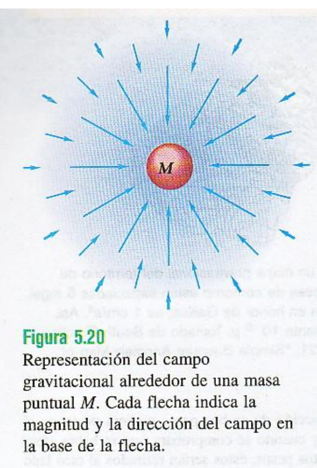


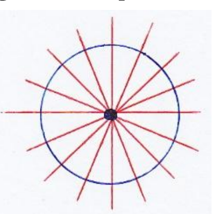
Figura 5.20
Representación del campo gravitacional alrededor de una masa puntual *M*. Cada flecha indica la magnitud y la dirección del campo en la base de la flecha.

$$\Gamma = \frac{F}{m_0} = G\frac{Mm_0}{r^2 m_0} = G\frac{M}{r^2} = [a_g]$$

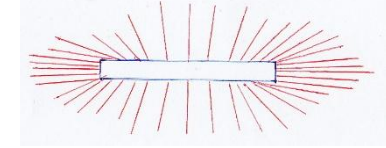
El campo se puede representar gráficamente como los vectores de aceleración en cada punto, con dirección al centro de masa y magnitud inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Pero Faraday introdujo el diagrama de *líneas de campo*, o líneas de fuerza, que representa la intensidad del campo por la densidad de líneas en razón de la superficie, que tiene la ventaja de mostrar gráficamente cómo varía el campo con la distancia, pues en un cuerpo puntual las líneas se abren en razón geométrica del cuadrado de la distancia (como sugiere la figura).

Figura 5.21
Líneas de fuerza *a*) alrededor de una masa *m* y *b*) alrededor de una masa 2*M*.

Con este método pueden intuirse visualmente muchos fenómenos cuyo cálculo matemático sería complejo. Por ejemplo, el campo gravitatorio en torno a una masa esférica no depende en su geometría del radio de la esfera sino sólo de la masa: la gravedad que sufre un hombre parado en la superficie de la Tierra es exactamente la misma que sufriría si toda la masa de la Tierra se concentrara en el centro de la Tierra, guardando apenas una cascarita para sostener sus pies a la misma distancia del centro. En la superficie de la Tierra nadie notaría la concentración de masa (al menos por sus efectos gravitatorios). Lo mismo pasaría si el Sol se convirtiera en una estrella enana, de radio muchísimo más pequeño pero de igual masa: todos los planetas y asteroides seguirían con sus mismas órbitas invariables. Esto ocurre así porque la fuerza de gravedad responde a la variación geométrica de la inversa del cuadrado de la distancia, por lo que la distribución de masas en forma de esfera homogénea provoca el mismo efecto que si la masa estuviera concentrada en el centro (un buen problema geométrico a demostrar).



Si la forma de la Tierra, en cambio, fuera la de una gran moneda de igual masa, sostenida por cuatro tortugas de masa despreciable (aunque no parece sería tan despreciable), la fuerza de gravedad en el que estuviera parado en el centro sería muy pequeña (mayor o menor, según el grosor de la moneda), pues se contrarrestarían los efectos gravitatorios de la masa de los bordes. Es lo mismo que ocurre si alguien baja, con Julio Verne, hasta el centro de la Tierra: allí tendría gravedad cero.



Algo curioso: si la tierra fuera un cascarón esférico hueco y viviéramos del lado de dentro, como gusanitos de nuez, la gravedad nos elevaría del piso y nos arrastraría hacia el centro de la esfera, aunque no con fuerza cada vez mayor (lo que ocurriría si la masa estuviera concentrada en el centro), sino con fuerza cada vez menor, hasta anularse en el centro.

II. QUÉ SON MASA, INERCIA Y GRAVEDAD

Tenemos que hacer una cierta recapitulación de lo que venimos aprendiendo, porque si bien los efectos se explican por sus causas, muchas veces las causas se conocen mejor por sus efectos, lo que nos obliga a hacer círculos en el progreso de la ciencia. Es evidente que la masa es causa de los fenómenos de inercia y gravedad, pero la consideración de estos fenómenos nos revela mejor qué pueda ser la masa de los cuerpos. Volvamos, entonces, para atrás, y resumamos lo que sabemos de la masa, repasemos lo que es la inercia e intentemos decir qué es la gravedad.

1º Qué es masa

En todo nuestro *Curso de Física* no analizamos sino los cambios más superficiales, que son los de lugar. En el análisis más profundo del cambio substancial, la verdadera Física descubre una composición radical de los

cuerpos naturales en dos coprincipios, la *materia prima* y la *forma substancial*. Aquí no intentamos explicarlos, sino sólo los mencionamos como referencia para el que los ha estudiado o como acicate para que se quieran estudiar. De la materia prima, principio de indeterminación, se sigue la *cantidad* como primer atributo o accidente de todo cuerpo natural. La materialidad es condición tan universal de los cuerpos físicos, que se suele identificar corporeidad con extensión: ser cuerpo o corpóreo equivale a tener cierto volumen. La relación entre materia prima y cantidad se muestra tan fundamental, que no cabe pensar aquélla sin ésta, ni ésta sin aquella. Aquí sólo podemos proponer esto como un principio, pues su consideración, repetimos, pertenece a la Física del cambio substancial.

La forma substancial, principio de determinación, es concretizada por la materia prima signada por la cantidad (expresión escolástica que no cabe explicar acá). La forma da razón de todos los aspectos esenciales o *quiditativos* de las cosas, desde los más genéricos a los más específicos. Ahora bien, después de la cantidad, que se sigue de la materia prima, el atributo o accidente más general de los cuerpos naturales parece ser la *masa*, y mientras más progresamos en la consideración de los fenómenos físicos, más lo parece. La masa es ciertamente una cualidad, forma accidental que se sigue evidentemente de la forma substancial.

¿Hay que decir, como dijimos para la materia prima y la cantidad, que no puede darse una forma substancial sin masa ni masa sin forma substancial? Es evidente que la existencia de masa supone claramente una substancia, o al menos una partícula de substancia. Pero no es tan evidente que no pueda darse una substancia sin masa. Porque la observación de la realidad natural muestra que la masa se concentra en ciertas partes extensivas, dejando muchos espacios sin que se note su presencia. Aquí es donde interviene la discusión acerca del vacío. Es evidente – hay que sostenerlo – que no puede aceptarse la existencia de espacio estrictamente vacío, es decir, de cantidad sin fundamento substancial. La cantidad es accidente de una substancia con materia prima. Es una confusión imaginativa aceptar la existencia de espacios llenos de «nada». Esta confusión nace de identificar los cuerpos naturales no sólo con la extensión, sino también y principalmente con la masa. La masa es una cualidad que se distribuye desigualmente sobre la cantidad, pero masa y cantidad no son sino accidentes de la substancia natural. Ni la substancia se identifica con la cantidad, como quería Descartes, ni con la masa, como parecen pensar los físicos modernos.

Sin embargo, nos inclinamos a pensar que esta confusión nace de cierta verdad y que no puede haber substancia natural sin masa, sin manifestación de masa en alguna de sus partes. Se hace evidente que el *vacío* intersticial de un cuerpo (las partes de densidad nula entre las partes de densidad finita, como electrones y núcleos) pertenece a dicho cuerpo y es cantidad suya. Pero la física sugiere que el mismo vacío exterior a los cuerpos (el que se da entre los cuerpos celestes) no deja de depender en múltiples aspectos, aún en su geometría, de los cuerpos presentes, por lo que parece poder pensarse que dependa de los cuerpos a modo de emanación. Esto lo dejamos como hipótesis a verificar.

Aceptando esta hipótesis como verdadera, podemos decir que la masa es cualidad que se sigue de la forma substancial de los cuerpos naturales en su función más genérica de dar corporeidad. La forma substancial, dijimos, es la que determina en las substancias naturales sus aspectos más genéricos y más específicos. El aspecto más genérico de las substancias naturales es su corporeidad. Ahora bien, la primera función de la forma substancial en orden a la corporeidad es la determinación de la cantidad, accidente que se sigue de la materia prima. Pero, según lo que sugiere la observación física (hipótesis que aceptamos), la determinación de la cantidad depende de la distribución de la densidad de masa[1]. Y de esta distribución espacial de la densidad y determinación de la cantidad parecen depender todas las propiedades físicas de los cuerpos[2]. Por lo tanto, si tenemos en cuenta que la cualidad en general es un *determinativo de la substancia según el ser accidental* (definición que se da en la lógica de las categorías), la masa corporal – entendiendo por masa corporal no solamente su valor medio absoluto, sino también y especialmente su distribución espacial, medida por la densidad – es el determinativo primero de la corporeidad de la substancia natural.

En el tratado de las categorías, en Lógica, se señala también que la cualidad se divide en cuatro especies: *disposición, potencia, cualidad pasible y figura extensiva*. La masa no es disposición, porque lo propio de la disposición es ordenarse a favor o en contra de la naturaleza, y no cabe decir esto de la masa. Tampoco es figura, sino aquello que causa la figura extensiva de los cuerpos. Queda por determinar si es potencia activa o cualidad pasible.

---

[1] En cosmología se ve que los estados más fundamentales de los cuerpos dependen de la densidad. En compresiones crecientes se tienen los estados propios de las estrellas enanas, de estrellas de neutrones y de agujeros negros. Es verdad que para densidades menores entra a jugar papel principal el equilibrio eléctrico. Pero parece que hay que pensar que la masa juega un papel más fundamental en la configuración de la materia.

[2] Hay que comprobar en qué medida dependa de la densidad la electricidad positiva o negativa de las partículas, pero la física de las partículas fundamentales parece aceptar que una compresión muy alta de los átomos puede provocar que protones y electrones se unan y anulen eléctricamente formando neutrones, tal como parece ocurrir en las estrellas de neutrones.

Las dos propiedades que se siguen de la masa en los cuerpos naturales y la ponen de manifiesto son, como hemos visto, la inercia y la gravedad. Si se entendiera por inercia la fuerza que un cuerpo en movimiento hace para impulsar a otro, y la gravedad como la fuerza con que un cuerpo atrae a otro, quizás podría pensarse que la masa fuese una potencia activa, que hace capaz al cuerpo de tales acciones. Pero, por una parte, ya hemos visto que no puede confundirse inercia y gravedad con las fuerzas que provocan, por lo que, en todo caso, habría que pensar que las potencias activas fueran la misma inercia y gravedad, siendo la masa el fundamento de las mismas; y por otra parte, como veremos a continuación, la inercia y gravedad no deben considerarse como potencias activas sino como potencias pasivas. Por lo tanto, es claro que la masa es una *cualidad pasible*, lo que en Lógica se define como el *determinativo de la substancia según la pasión*.

Las cualidades pasibles se definen así porque son o aparecen como el resultado de una alteración de la substancia. Son justamente las cualidades donde se dan los contrarios, sin los cuales no se entiende el movimiento de alteración. Respecto de la masa se da como la primera contrariedad de las substancias corporales, que es la que hay entre denso y raro (en el sentido de poco denso, enrarecido). Es más, lo que sostenemos es que, en cuanto a la masa, la contrariedad fundamental que se da en lo corpóreo es entre *lleno y vacío*, con todos los grados continuos de densidad entre el vacío absoluto y el lleno máximo, que los físicos todavía no han podido determinar y que no puede ser, como livianamente sostienen algunos, la *singularidad* de «densidad infinita», porque lo infinito es indeterminado.

Como cualidad pasible, la masa es o se entiende como el resultado de una pasión. ¿De qué pasión resulta la masa? Siendo la cualidad pasible primera, depende del movimiento primero, de manera que la masa es como el resultado del movimiento local en toda su generalidad. Porque, como ya hemos dicho y trataremos de profundizar, el cambio de lugar no se entiende sino como cambio de la masa respecto de la extensión de los cuerpos, o en un lenguaje cercano al de Demócrito, como cambio de lo lleno en lo vacío (con la diferencia que Demócrito entendía lo lleno y vacío como equivalente a ser y no ser, como parecen entenderlo los modernos). El trasladarse de un cuerpo consiste en el cambio de lugar de partes con masa respecto de las partes vacías (que se hace difícil decir a qué cuerpo pertenecen). Como hemos ido viendo, todos los agentes del cambio local obran sobre las partes con masa y en razón de las masas, cambiando su distribución espacial, concentrándola en mayor densidad o disipándola en rarificación.

Si tenemos en cuenta que inercia y gravedad son las manifestaciones más fundamentales de la corporeidad de las substancias naturales, y que ambas dependen principalmente de la masa, de modo que la mayor o menor masa implica una mayor o menor vigencia o vigor de la corporeidad, función más genérica de las formas substanciales naturales, podemos definir la masa como el *vigor de la corporeidad de la substancia natural*. Usamos el término «vigor» para que se entienda la masa como cierto efecto de la corporeidad natural, cuyo principio no puede ser otro que la forma substancial, y con idea de más y menos, pues la vigencia de un principio puede ser mayor o menor. Nos parece la manera más simple en que pueda quedar suficientemente claro el carácter de *cualidad pasible* de la masa.

La masa inhiere en la substancia por medio de la cantidad o extensión, que es el primer accidente corporal y, por lo tanto, como el sujeto inmediato de la masa, que se distribuye en la extensión según densidad. De allí que la densidad sea otro aspecto fundamental de los cuerpos, en la medida en que conjuga masa y extensión. La densidad, entonces, puede decirse que es la distribución del vigor de corporeidad en la extensión de la substancia natural.

Hemos dicho, entonces, qué es la masa, dando su definición, y hemos señalado su relación con los principios de la substancia: como cualidad tiene relación con la forma substancial en su función más genérica de corporeidad; como cualidad pasible tiene relación con la materia prima, con la que además se vincula en cuanto determinante primero de la cantidad. Señalamos también su relación con el primero de los cambios que afectan la substancia, el cambio local, y con las primeras pasividades: la inercia y la gravedad, como ahora pasamos a explicar mejor.

2º Qué es inercia

Hasta ahora hemos hablado mucho de inercia pero todavía no hemos dicho qué es, *quid est*. Dijimos que el movimiento inercial es aquél por el que un cuerpo se mueve a sí mismo cuando no está sometido a ninguna fuerza externa. Y se dice también que la inercia es lo que hace que un cuerpo se resista a todo cambio de estado de movimiento, de manera que, si está en reposo, tiende a permanecer en reposo, y si en movimiento, tiende a conservar el momento de su movimiento. Para cambiar este estado, es necesario aplicar una cierta fuerza sobre el cuerpo.

Podría pensarse, por tanto, que la inercia fuese una cualidad de los cuerpos naturales perteneciente al segundo género de cualidad, la potencia, en cuanto parece ser un *principio de acción y resistencia*[1]. Parece ser principio de acción, pues la inercia sería lo que hace que un cuerpo se mantenga en movimiento. Y es también

[1] Ésta es la definición que dimos de potencia (activa). Cf. «Definición de cualidad», p. 24.

principio de resistencia, pues se opone a todo cambio de movimiento, debiendo hacerse fuerza para vencerla. Es frecuente que las cualidades pasibles funden potencias activas, como el calor en el hierro, que es cualidad pasible, funda la potencia de calentar y quemar, que es potencia activa. En este caso, la inercia parece poder pensarse como potencia activa fundada en la masa de los cuerpos, que dijimos es cualidad pasible.

Pero no puede entenderse la inercia como potencia activa (que sólo la potencia activa es cualidad). No puede pensarse que una potencia activa fundada en la masa sea lo que mueve a la misma masa de su lugar. Es como decir que la potencia calefactiva del hierro, que se funda en el calor del hierro, es lo que produce el mismo calor del hierro: es como la gallina que se engendra a sí misma. Todo esto va contra el principio de causalidad, pretendiendo no solamente sacar una cosa de la nada, sino además darse aires de científico diciendo que la causa eficiente es la misma cosa. La inercia no es una potencia activa sino una *potencia pasiva* que, aunque se entiende a modo de cualidad, no tiene entidad real de cualidad, pues no tiene una realidad actual y efectiva (no es realidad accidental *en acto*), sino que se trata de una pura apertura y posibilidad (es lo que Aristóteles define como entidad *en potencia*).

Como dijimos al considerar las potencias pasivas en general[1], si bien no tienen realidad actual, tienen un fundamento real con dos aspectos, positivo y negativo:

- *Aspecto positivo*. La potencia pasiva es una aptitud de sufrir un cambio accidental (pues no estamos considerando la potencia pasiva de corruptibilidad, que mira el cambio substancial). Pero esto supone en la substancia natural una cierta realidad accidental capaz de sufrir el cambio o modificación de la que se dice pasible.
- *Aspecto negativo*. La naturaleza de las substancias tienden a darle a sus accidentes una forma determinada, que no es siempre necesaria (de modo que sin ella no pueda existir), sino que frecuentemente puede ser modificable dentro de ciertos márgenes y con mayor o menor facilidad. Pues bien, la potencia pasiva supone cierta debilidad de la naturaleza en la determinación de la realidad accidental en que se funda, por cuya causa los principios activos pueden triunfar sobre ella más o menos fácilmente para modificarla[2].

El fundamento de la inercia es la masa. Es claro que la masa es la realidad accidental a la que se refiere la inercia, que puede sufrir cambio de lugar en el espacio vacío. La naturaleza corpórea de las substancias naturales tiende a mantener la masa quieta (inercia) y reunida (gravedad) en el espacio, y mientras hay mayor masa reunida en el mismo espacio (con mayor densidad), más difícil es moverla o separarla. La inercia se refiere a la posibilidad de movimiento de la masa considerada como un todo, mientras que la gravedad considera el movimiento de una parte respecto de otra. Y la inercia supone los dos aspectos señalados, pero habría que decir que los implica a ambos en positivo:

- Al hablar de la inercia de los cuerpos damos por sentado que tienen aptitud para moverse.
- Pero la mayor o menor inercia no significa una mayor o menor debilidad de la naturaleza para mantener su lugar, sino lo contrario: significa posibilidad de moverse pero también oposición al cambio.

Aquí es donde nos parece que hay que corregir la concepción moderna de la inercia. Los físicos modernos tienden a concebir el espacio como una nada dimensional (?), y renuncian a una determinación absoluta del movimiento, determinación que sólo tiene sentido y es posible respecto del espacio vacío. Para ellos pierde sentido la diferencia entre el estado de reposo y el de movimiento, porque se trataría solamente de una consideración relativa al observador: lo que está en reposo respecto de mí, se mueve respecto de ti, si es que tú te mueves. Y con este relativismo vino Einstein a ensombrecer los espíritus en lo contradictorio. Pero si no perdemos la sencillez, ¡y seguimos distinguiendo lo quieto de lo en movimiento!, vemos que la inercia no supone sólo una oposición al cambio de *estado de movimiento* (concepción resultante de no distinguir entre movimiento y reposo), sino una oposición al mismo movimiento. Las mismas leyes de la Física nos lo dejan claro, porque a medida que un cuerpo se va moviendo a mayor velocidad, se hace necesario más trabajo y energía para continuar aumentando su velocidad. Ya lo dijimos: no es lo mismo acelerar a 20 km/h que a 120 km/h. Por eso es totalmente esperable y natural

---

[1] Cf. «Potencias pasivas», p. 26.

[2] In V Metaph. lect. 14, n. 963: "Todo aquello que tiene la posibilidad de padecer algo, debe tener en sí cierta disposición que sea causa y principio de tal pasión, y este principio se denomina «potencia pasiva». Ahora bien, el principio de pasión puede darse en algún pasible de dos maneras: *De un modo*, por cuanto *tiene* algo, como el hombre tiene posibilidad de padecer enfermedad por causa de la abundancia de algún humor desordenado en sí mismo. *De otro modo*, algo es capaz de padecer por cuanto *está privado* de algo que pueda repugnar a la pasión, como si se dijera que el hombre es capaz de enfermarse por causa de la substracción de fortaleza y de virtud natural. Pues bien, en todo aquello con potencia de padecer, deben darse estas dos cosas, porque algo nunca padecería si no hubiera en él un sujeto que fuese receptivo de la disposición o forma que se induce por la pasión, y si no se diera una debilidad en el paciente para resistir la acción del agente".

que haya límites naturales para la velocidad de los cuerpos, impuestos por la misma masa, como no deja de afirmar el mismo Einstein. Resulta que, por una parte, la velocidad de la luz es un límite absoluto al movimiento corporal, y por otra, no habría posibilidad de determinar velocidades absolutas. Metido en este galimatías[1], pretende salir abriendo la puerta prohibida de la contradicción temporal: algo puede ser para uno y no ser para otro a la vez.

La inercia, entonces, como la palabra lo indica, es como una ineptitud de los cuerpos al movimiento. Inercia viene del latín *inertia*, que viene a su vez de *iners*, formado de la partícula privativa *in* y de *ars*: arte. *Iners* significa inhábil, desidioso, tímido, perezoso. La inercia, por lo tanto, puede definirse como *la renuencia de los cuerpos al movimiento*.

El término «renuencia» quizás no sea el más propio, pues etimológicamente viene de *re-nuo*: hacer señas negativas con la cabeza, por lo que se usa más en lo voluntario que en lo natural. Pero se usa para significar una cierta oposición y repugnancia. No decimos «resistencia», porque esta palabra tiene un sentido más activo, y la inercia es algo pasivo. Tampoco «oposición», porque los opuestos se impiden uno al otro, y la inercia no deja de estar y de resistirse aun cuando el cuerpo se mueva. «Repugnancia» tiene, en el uso común, mayor pertenencia a lo voluntario que renuencia, que es menos usado. De allí nuestra preferencia.

Decimos «de los cuerpos» sin referirnos explícitamente a la masa corporal por dos motivos: porque sostenemos que los cuerpos se caracterizan en cuanto tales por tener masa, pues la masa es el *vigor de la corporeidad de la substancia natural*; y porque la inercia no puede ser una pasividad que resida exclusivamente en la masa, pues la renuencia a la aceleración y la conservación del movimiento inercial se dan por cierta acción y reacción de las partes másicas con el vacío circundante.

No definimos la inercia como una tendencia a la conservación del movimiento, porque esto no nos parece ser más que una consecuencia y propiedad de la inercia. La renuencia al movimiento es absoluta: la inercia lleva a no moverse, y si se mueve, a no moverse más, y mientras más rápido se mueve, más a disgusto anda, hasta que, como un burro, parece que a la velocidad de la luz se planta.

Esta definición es una propuesta a aceptar por la comunidad físico-tomista, que no existe – pues le escribimos a nadie en la mayor soledad –, por lo que no nos gastamos en precisar letra chica.

3º Renovada imagen de los cuerpos naturales

Los antiguos siempre asociaron corporeidad a extensión, teniendo además los cuerpos naturales la cualidad de ser graves o leves: el fuego era leve por esencia y el aire por participación, la tierra era grave por esencia y el agua por participación. Los cuerpos leves se alejan del centro de la tierra y los graves se acercan. Pero el accidente primero de lo corporal es la cantidad o extensión, y la continuidad extensiva es la señal primera de la unidad substancial.

Los modernos fueron viendo que no había un único centro de atracción o repulsión, y concluyeron que todos los cuerpos se atraen por una gravedad universal fundada en la masa, que es la que hace a los cuerpos más o menos graves. Por otra parte llevaron la discusión acerca del vacío, y terminaron mostrando que puede darse el vacío de toda substancia reconocible. Y en este punto muchos físicos, mejores matemáticos que filósofos, se fueron haciendo la idea que el espacio vacío era una extensión sin nada. Junto con esto se fue percibiendo la pequeñez de las partículas elementales de los cuerpos, que concentraban la masa y diversas propiedades, y fue resucitando entre los físicos el atomismo de Demócrito, que dividía la realidad entre el ser de los corpúsculos materiales y el no ser del vacío. Ahora tienden a asociar la corporeidad a la masa, disociada de la extensión. No queda muy claro qué es un fotón, partícula sin masa pero con energía, pero lo que sí queda claro es que desapareció la continuidad extensiva de las substancias, y con ella las substancias mismas. Las supuestas substancias naturales son nubes de partículas discontinuas, ligadas por mutuas influencias que vuelan por la nada vacía. Si a esto le agregamos que la nada vacía no puede ser referencia de nada, por lo que el movimiento sólo puede entenderse como relativo de partícula a partícula, terminamos en la contradicción relativista que enloquece a los científicos de hoy en día[2].

---

[1] Término un poco irreverente, pues viene del griego κατὰ Ματθαῖον, *según Mateo*, porque el primer Evangelista empieza su Evangelio con la genealogía de Jesucristo, que plantea problemas muy difíciles de resolver.

[2] Para muestra un botón. Shahen Hacyan explica, en *Los hoyos negros y la curvatura del espacio-tiempo*, Fondo de cultura económica, México 2003, la solución de Reissner-Nordstrom de la ecuación de Einstein para el espacio-tiempo de un hoyo negro eléctricamente cargado, y entre otras cosas comenta (p. 104): "Se ha demostrado que el acercarse al horizonte interno del hoyo produce un efecto semejante al que ocurre cuando se emerge de un hoyo blanco. Una nave espacial que penetre a un hoyo cargado seguirá observando el universo exterior, aunque ya no pueda comunicarse con él. A medida que la nave se acerca al horizonte interno, los tripulantes verán el tiempo en el exterior pasar cada vez más y más rápidamente, como si estuvieran viendo todo el universo filmado en cámara rápida. En el momento de llegar al horizonte interno habrán presenciado, en lo que es un instante para ellos, toda la historia futura del universo hasta tiempos infinitos". La nave alcanza una relación de contemporaneidad (simultaneidad) con todos los tiempos, a la manera del Ser divino. Curioso.

Hay que recuperar la cordura. El primer accidente de la substancia natural es ciertamente la cantidad dimensiva y no puede pensarse una extensión llena de nada. Debemos volver a *llenar* la imagen deformada que la física moderna nos proyecta de los cuerpos naturales, como nubes de puntos. Los cuerpos tienen su propia cantidad continua, aunque no tengan continuidad sus demás propiedades, empezando por la masa. Ésta se hace más o menos densa en pequeñas islas, y prácticamente nula en las zonas interisleñas, fundando una serie de propiedades, empezando por la inercia y la gravedad. Podemos llamar *espacio vacío* a la extensión sin masa, siempre y cuando entendamos que está vacío de masa y no vacío de substancia. La realidad física de este espacio vacío se hace absolutamente necesaria como *medio* que explique la proyección de influencias de isla a isla.

No parece haber problema en recuperar este *lleno* interior de las substancias corpóreas. Pero reconocemos que no nos resulta tan sencilla la concepción del espacio vacío interestelar. ¿Por qué no entenderlo, como muchos científicos, como un elemento distinto: el éter? No descartamos sin más esta hipótesis, pero no nos parece aceptable. No parece razonable pensar que haya una substancia casi puramente pasiva, como si tuviera materia prima casi sin forma substancial. El éter por sí mismo no parece ser más que un medio y sujeto de influencias, que si hubiera sido creado sin la presencia de ningún cuerpo másico, no ofrecería al parecer ninguna propiedad más allá de su extensión. No parece que pueda darse una forma natural sin alguna propiedad más allá de la cantidad. Como dijimos, nos inclinamos a pensar que de toda forma substancial natural se sigue al menos la masa como primera propiedad. Ésta es la hipótesis que nos parece tanto más razonable tomar que nos animamos a darla por cierta y fundarnos en ella.

¿Qué decir, entonces, de los inmensos espacios de vacío interestelar? Parece comprobado que no todo es falso en los elementos que se manejan en la teoría de la relatividad (nosotros criticamos el mismo relativismo del movimiento y su consecuencia respecto del tiempo). Por motivos, por ahora, más bien metafísicos que físicos, nos inclinamos a aceptar que la geometría del espacio dependa de la masa de los cuerpos presentes, de manera que una concentración de la masa universal pudiera contraer el volumen total del universo en una geometría circular, al modo de los espacios de Riemann[1]. Este fenómeno sugiere que el espacio vacío depende de alguna manera de la masa corporal, por lo que puede entenderse como una proyección o emanación o resultancia de la distribución de masas. Esto nos lleva a pensar la totalidad del universo corporal al modo como dijimos que hay que pensar un cuerpo particular: los espacios vacíos se proyectan en continuidad de las islas densas.

Si hubiera sido cierto que Dios creó el universo a partir de un único cuerpo inicial que luego se dividió y expandió, este cuerpo inicial podría pensarse a la manera de un huevo (sin cáscara), con una yema de masa densa y una clara de espacio vacío. El cuerpo en su conjunto no puede pensarse en movimiento local, pues no hay extensión fuera de él por donde pueda moverse. El movimiento local debe entenderse como propio de las partes con masa respecto del espacio vacío. ¿Podría entonces pensarse que, por ejemplo, la yema densa total girara en la clara vacía? Aunque no parece contradictorio (es decir, no parece metafísicamente imposible), sin embargo tampoco parece natural, porque sería un movimiento local sin causa natural, atribuible sólo al Primer Motor divino. Como Dios suele obrar, en lo posible, por las causas segundas (argumento metafísico), hay que pensar más bien que los movimientos locales del universo corporal son de parte respecto de parte, de manera que conserven *nulo* el momento total, tanto de traslación como de rotación (éste es un asunto que todavía no hemos estudiado). Los movimientos intrínsecos de las partes con masa tienen que darse de parte másica a parte másica, de modo que si una parte se mueve a un lado, lo hace por empuje de otra que se mueve al lado contrario; y si una parte gira en remolino, lo hace por compensación con otra que gira en remolino de sentido contrario. Estas son leyes de simetría que parece razonable exigir en el movimiento total.

La geometría del espacio vacío, esto es, no sólo su forma sino también su misma extensión, parece depender razonablemente de la distribución de masas, como proponen las teorías relativistas (en la suposición que este aspecto de la teoría pueda sostenerse sin aceptar el relativismo del movimiento y del tiempo). Si las masas se concentran, la proyección de espacio vacío se *curva* y achica; si la distribución de masas se abre, el espacio se extiende y *aplana* (la curvatura del espacio es un concepto que se las trae).

Suponiendo que el espacio vacío no es una substancia específicamente distinta de las demás, que mereciera llamarse éter – según sostenemos –, parece que debe pensarse como un puro medio completamente pasivo. En primer lugar, hay que pensarlo *quieto*, pues para darle movimiento local tendríamos que suponer otro superespacio respecto del cual se pudiera trasladar. Su única variabilidad sería geométrica (en geometría no cartesiana), según las figuras de la cantidad, en dependencia de las propiedades de las partes con masa. Hemos ido sugiriendo más

[1] La extensión del universo no puede ser infinita, pues el infinito es indeterminado y no puede existir, pero tampoco puede tener superficies de frontera, pues ¿contra qué terminaría, si el universo es lo único corporal que existe? La geometría del universo no puede ser cartesiana, y tiene que ser necesariamente distinta de lo que nuestra imaginación nos pinta.

arriba que habría que considerarlo al modo de un medio elástico, para explicar tanto el movimiento inercial como el gravitatorio. Si hay que explicar la conservación del movimiento por inercia como una interacción entre la parte másica y el espacio vacío – pues no hay otra manera –, la intervención del espacio vacío parece que debe pensarse al modo de una ondulación geométrica provocada en la impulsión de una partícula con masa respecto de otra semejante. Todo hace pensar que el fenómeno de inercia es un aspecto del mismo fenómeno de la gravedad, que puede entenderse más fácilmente porque es estático, mientras que aquel es dinámico. Son ideas en estado indefinido, que ni nosotros entendemos, pero confiamos en que, explicando mejor la gravedad, se irán aclarando.

4º Qué es gravedad

Hemos comprobado la *existencia* del fenómeno denominado gravedad que, considerado junto con la inercia, nos lleva a declarar que el estado natural de los cuerpos es el reposo y la reunión. Ahora conviene que nos detengamos en determinar su *naturaleza*, al menos de manera general e inicial.

Se suele hablar de la fuerza de gravedad que cada cuerpo hace sobre todo lo que tiene cerca, proporcional a su propia masa y a la masa del cuerpo sobre el que se aplica la fuerza, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ambos. Y ante esa fuerza aplicada, sufre como reacción una fuerza de igual magnitud pero contraria. Si por *gravedad* entendemos el principio de dicha fuerza, ahora sí parece que hay que entender la gravedad como una potencia activa.

Pero tampoco es posible considerar la gravedad como potencia activa que resida en el cuerpo grave. La potencia activa del cambio local supone *energía*, que se invierte como fuerza que cambia el momento de un cuerpo. Un cuerpo en movimiento tiene energía cinética, y si choca con un cuerpo liviano lo acelera mucho, mientras que si choca con uno pesado lo acelera poco, y pierde la energía que invirtió en el choque. Un cuerpo caliente tiene energía calórica, y calienta rápidamente un cuerpo pequeño, mientras que tarda en calentar un cuerpo mayor, perdiendo la energía invertida en el proceso. Pero un cuerpo grave atrae los cuerpos con igual aceleración, sin importarle si tienen masa mayor o menor, y nada pierde en este proceso. Al contrario, la presencia de un cuerpo con masa lo acelera, a su vez, y le confiere energía cinética. No puede pensarse la gravedad como una energía poseída por el cuerpo grave, por lo que no puede pensarse como una potencia activa.

La gravedad es también, como la inercia, una *potencia pasiva*, que se funda en la masa: “Hay cierto principio de movimiento y cambio en aquello que cambia – dice Santo Tomás –, ya sea la misma materia [para el cambio substancial], o también algún principio formal, en [razón] del cual (*ad quod*) se sigue el movimiento, como a la forma grave o leve le sigue el movimiento hacia abajo o hacia arriba. Pero tal manera de principio no puede decirse de la potencia activa a la que pertenece este movimiento, pues «*omne quod movetur ab alio movetur*» (todo lo que se mueve es movido por otro), y nada puede moverse a sí mismo sino por sus partes, en cuanto una parte mueve la otra, como se prueba en el libro VIII de la *Física*. La potencia, por lo tanto, según que es principio de movimiento en aquello en lo que es, no se comprende bajo la potencia activa, sino más bien bajo la [potencia] pasiva. La gravedad en la tierra [es decir, en los cuerpos pesados] no es principio de mover, sino más bien de ser movido. La potencia activa del movimiento, por lo tanto, debe darse en otro distinto de aquello que se mueve, como la potestad edificativa no se da en lo edificado sino más bien en el edificante”[1].

La gravedad es también, como la inercia, una pasividad que resulta de la masa corporal, por la que los cuerpos tienden a reunirse o se resisten a separarse, con mayor vigor mientras más cerca están. La inercia se refiere al movimiento del mismo cuerpo, mientras que la gravedad es una pasividad del cuerpo que se refiere a los demás cuerpos, o de una parte a las demás partes corporales. Hablamos de cuerpos, sin más, y no de cuerpos másicos, porque damos por sentado que todo cuerpo tiene masa, y que la masa es justamente el *vigor de la corporeidad de la substancia natural*.

La gravedad es una especie de amistad corporal que, al igual que las amistades humanas, se debilita con la distancia. En esto se distingue, en alguna manera, de la inercia, porque la inercia es una renuencia al movimiento que crece con el mismo movimiento, mientras que la gravedad es una renuencia a la separación que decrece con la misma separación. La disminución es geométrica, es decir, disminuye tanto como disminuyen las líneas radiales espaciales. Si la geometría del espacio variara, es probable que varíe la manera de disminución de la atracción gravitatoria. Además, la inercia parece tener un límite, haciendo imposible acelerar un cuerpo más allá de la velocidad de la luz: ¿tiene también un límite la gravedad, de modo que más allá de cierta distancia ya no se da la

[1] In V Metaph. lect. 14, n. 955.

atracción, y la atracción se cambia en otra cosa? No se sabe bien, porque no se tiene experiencia directa de distancias tan grandes. La cosmología observa comportamientos inesperados respecto de la atracción gravitatoria. Los cuerpos intergalácticos parecen atraerse más fuertemente de lo esperable (por lo que se habla de una materia oscura, esto es, inobservable), y las distancias entre galaxias se agrandan demasiado, por lo que parecen repelerse (por lo que se habla de energía oscura). Al menos sabemos lo que pasa en distancias más humanas.

La gravedad, entonces, puede definirse como el *apetito de los cuerpos por incorporar los cuerpos cercanos*.

Para definir la gravedad recurrimos, inesperadamente para aquél que no está formado en el tomismo, a la noción de *apetito natural*, con largas raíces en el pensamiento de Santo Tomás. Tiene el inconveniente, como la renuencia que usamos para definir inercia, que etimológicamente se ha usado más para lo voluntario que lo natural, pero esto mismo se transforma en ventaja, pues se inscribe en una línea de tendencias análogas que enriquece enormemente su comprensión. La gravedad de los cuerpos es una tendencia análoga al apetito de nutrición de los vegetales, al apetito concupiscible de los animales y al apetito intelectual o voluntad de los hombres. No es fácil encontrar una expresión que signifique tendencia a una acción y que no implique algo activo sino pasivo. La noción de apetito natural se aplica, en primer lugar, a la tendencia de la potencia pasiva a recibir su acto propio. Así se dice que la materia prima tiene apetito por la forma substancial. La gravedad aparece como la primera manifestación en el orden accidental del apetito de la materia prima por la forma. Si la extensión es propiedad de la materia prima y la masa de la forma corporal, la tendencia pasiva de los cuerpos a reunirse con los demás cuerpos en la menor extensión se ve como una prolongación, en la substancia corpórea, de dicha tendencia de la materia prima por la forma corporal.

Decimos que es un apetito *por incorporar* los demás cuerpos. No resulta literariamente elegante repetir tres veces una misma expresión: *cuerpos incorporar cuerpos*, pero obligado a sabores amargos, el científico termina perdiendo el gusto literario. La masa es el vigor de la corporeidad, y la gravedad tiende a reunir las masas y aumentar en lo posible la densidad, esto es, la concentración de las masas en la menor extensión posible. De allí que la mejor manera de expresar lo formal de la tendencia de la gravedad sea hablar de *incorporación*, pues tiende a hacer de los diversos cuerpos uno solo, y tiende a densificar las partes de un mismo cuerpo.

La gravedad, decimos, es el apetito de un cuerpo por los demás *cuerpos*, porque tiende a acercarlos en la medida de su corporeidad, esto es, de su masa. Y le agregamos cuerpos *cercanos*, para expresar de alguna manera que el apetito crece con la cercanía.

Demos por suficiente lo dicho acerca de la naturaleza de la masa, la inercia y la gravedad, así como la referencia a sus propiedades, y pasemos a investigar sus causas, lo que nos permitirá, quizás, penetrar mejor en lo dicho.

B. Los agentes del movimiento gravitatorio

I. La energía gravitatoria

Hemos hablado de los *agentes cinéticos*, que son aquellos que tienen potencia activa para mover localmente los cuerpos, aplicándoles una fuerza e imprimiéndoles un cierto momento. Hasta ahora, el único agente cinético que hemos analizado son los mismos cuerpos en movimiento, y hemos denominado *energía cinética* a su capacidad de mover o potencia activa. Pero observamos que la gravedad, sea lo que sea, también es capaz de mover los cuerpos, pues cuando dos cuerpos están cerca, sufren una aceleración de acercamiento debido al apetito de incorporación gravitatorio. La gravedad, dijimos, es una potencia pasiva, pero es claro que bajo ciertas condiciones, el fenómeno gravitatorio se constituye en agente cinético, con cierta potencia activa. Como los físicos han reservado el nombre de energía para las potencias activas cinéticas, tenemos que hablar ahora de cierta *energía gravitatoria*.

1º Energía gravitatoria relativa

Sabemos que un cuerpo, a cierta altura, es atraído a la tierra con la aceleración característica de la gravedad terrestre, $g = 9.8\ m/sg^2$. Esta aceleración se debe a la aplicación de una fuerza, que no es otra que lo que se denomina *peso* de los cuerpos, según la relación: $F = ma$. Y a medida que desciende, el cuerpo adquiere una energía cinética $E = \frac{1}{2} mv^2$. La energía cinética del cuerpo que cae, que lo hace capaz de mover a su vez otro cuerpo o hacer algún destrozo, tiene una entidad cinética que no puede venirle de la nada, sino de cierta energía escondida en la situación primera, a la que hacemos bien en llamar energía gravitatoria. Las leyes de la causalidad nos exigen que la energía gravitatoria sea igual o mayor que la energía cinética adquirida por el cuerpo en su caída. Y si

suponemos que no se están dando otros fenómenos físicos que supongan cierta actividad cinética, podemos quedarnos con el caso mínimo y decir que es igual. Como es evidente que, mientras de más alto cae el cuerpo, mayor energía cinética adquiere, podemos calcular la energía gravitatoria que debe atribuirse a un cuerpo según su altura.

Un alumno laborioso puede que comience calculando la velocidad final de un movimiento acelerado en función de la aceleración y la altura[1]: $v = \sqrt{2gh}$ Luego la reemplaza en la ecuación de la energía cinética y tiene: $E = \frac{1}{2}m(\sqrt{2gh})^2 = mgh$ Pero un alumno despierto y perezoso podría pensar también que la energía final equivale al trabajo que hace la fuerza de gravedad o peso del cuerpo, que es igual a la fuerza multiplicada por la distancia recorrida, que en este caso es la altura: $E = Fh$ Y como la fuerza es igual a la masa por la aceleración de la gravedad, que no varía con la altura (para alturas no muy grandes), tenemos también: $E = mgh$ Así es más fácil, pero lo otro tiene su mérito.

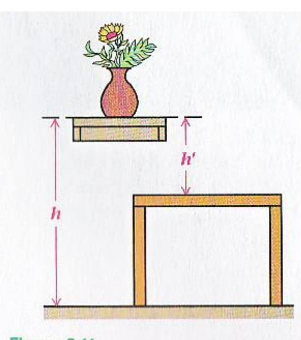


Figura 6.11 La energía potencial de un florero respecto a la masa (mgh') es menor que su energía potencial relativa al piso (mgh).

Como somos físicos aristotélico-tomistas, no nos gusta el relativismo. Nosotros sostenemos que la energía tiene entidad física, es potencia activa, una cualidad actual de los cuerpos. Pero según el cálculo que hicimos, la energía gravitatoria es relativa, pues como depende de la altura, se tiene una respecto del piso y otra respecto de una mesa. ¿Cómo son las cosas en absoluto?

2º Energía gravitatoria absoluta

Los cuerpos tienden a estar en reposo y reunidos, es decir, incorporados: éste es el estado natural de los cuerpos considerados en cuanto tales, en su corporeidad. Así como la energía cinética aparece al poner un cuerpo en movimiento, así también la energía gravitatoria aparece al separar dos cuerpos, o al alterar el orden de incorporación natural de sus partes. El orden corporal de las partes de un cuerpo como la tierra, si estuviera en reposo y fuera homogéneo, sería el de una perfecta esfera. Cuando su superficie se arruga por el choque de placas continentales y se levanta una cordillera, allí se tiene energía gravitatoria, pues las piedras de esas montañas están fuera del equilibrio corporal, y tienden a aplanarse de nuevo. Lo mismo ocurre entre dos cuerpos como la Luna y la Tierra, que tienden a incorporarse en una única esfera: la energía gravitatoria aparece con la separación, en dependencia de las masas de ambos cuerpos y de la distancia a que han sido separados.

Si simplificamos las cosas y dejamos de lado el orden de las partes de cada cuerpo, la energía gravitatoria que aparece entre dos cuerpos es igual al trabajo que hay que tomarse en separarlos, del mismo modo como la energía elástica de un resorte depende del trabajo que se hace al comprimirlo o extenderlo[2]. Como el trabajo se mide por el producto de la fuerza por la distancia, aquí nos viene bien la expresión newtoniana de la fuerza gravitatoria:

$$E_g = \int F\partial x = \int G\frac{m_1 m_2}{x^2}\partial x$$

Como las masas y G son constantes respecto de la distancia, y $\int \frac{1}{x^2}\partial x = -\frac{1}{x}$ tenemos:

$$E_g = -G\frac{m_1 m_2}{x}$$

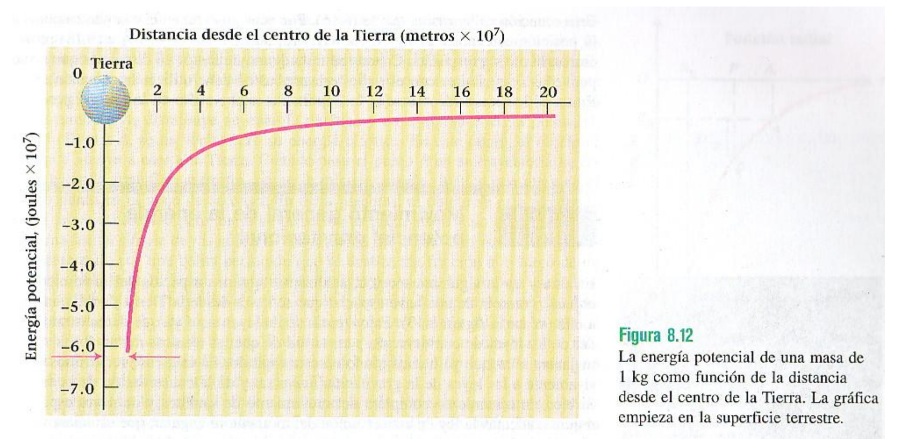


Figura 8.12 La energía potencial de una masa de 1 kg como función de la distancia desde el centro de la Tierra. La gráfica empieza en la superficie terrestre.

La ecuación resulta problemática porque nos da una energía negativa, que tiende a cero para distancias muy grandes y tiende a infinito para distancias muy pequeñas. Pero el problema no es tanto físico sino matemático. Físicamente consideramos que el punto de energía gravitacional cero es el del cuerpo en perfecta incorporación, que puede tener su masa más o menos concentrada, esto es, puede tener mayor o menor densidad, pero siempre ocupa un cierto volumen. Mas como las ecuaciones suponen la masa concentrada en el punto x = 0, en este punto se

[1] Véanse las ecuaciones para el Movimiento Uniformemente Acelerado, p. 59.

[2] La diferencia está en que el resorte sigue la ley de Hooke, por la que la fuerza *crece* en razón de la distancia, mientras que la gravedad sigue la ley de Newton, por la que la fuerza *decrece* en razón del cuadrado de la distancia.

produce una discontinuidad, pues la fuerza gravitatoria tiende a infinito y no hay modo de definir allí la energía. Como se ve en el gráfico adjunto, si calculamos la energía gravitatoria de un cuerpo de 1 kg masa que se aleja de la tierra, tendríamos que suponer energía cero en el punto en que se incorpora a la tierra, esto es, en la superficie terrestre. A partir de allí la energía gravitatoria crece, y lo interesante que se observa es que no crece indefinidamente, sino que tiende a un máximo, que en el gráfico es la energía cero, a la que se tiende mientras el cuerpo se aleja al infinito, pero que en la realidad es todo lo que aumentó la energía a partir del alejamiento mínimo de superficie.

Para expresarlo matemáticamente, como tanto gusta a los nuevos físicos, hay que decir que la energía gravitacional que aparece entre dos cuerpos que se alejan es igual a la energía final que tienen separados, menos la energía inicial que tienen en el estado de incorporación, en el que los centros de masa (concepto que aclararemos más adelante, pero que en los cuerpos homogéneos coincide con el centro geométrico) están a la distancia mínima de incorporación, determinada por las leyes de la naturaleza:

$$E_g = E_x - E_{mín} = -Gm_1m_2(\frac{1}{x} - \frac{1}{R})$$

Llamamos R a la distancia mínima porque los cuerpos de gran masa suelen tomar una forma esférica, por la simetría de la gravedad, y la distancia vendría a ser el radio de dicha esfera (en el caso graficado, prácticamente el radio de la tierra). Como se trata de alejamiento, siempre se da que $x \geq R$ por lo que el paréntesis en la ecuación es siempre negativo y la energía resultante es positiva (la energía gravitatoria crece al alejarse los cuerpos). Es interesante observar que, para distancias grandes y tendiendo a infinito, $\frac{1}{x}$ tiende a cero y la energía gravitacional adquirida tiende a $E_{gmax} = G\frac{m_1m_2}{R}$ Es decir, la energía gravitatoria máxima depende totalmente del estado inicial que tienen los cuerpos en el estado de incorporación natural.

Puede parecer que este cálculo de la energía gravitatoria absoluta no tiene que ver con el de la energía relativa del punto anterior, pero es fácil observar que aquél se reduce a éste. Si queremos calcular la energía gravitatoria de un florero de masa m a una altura h del piso, tenemos: $E_g = GM_Tm(\frac{1}{R} - \frac{1}{R+h}) = GM_Tm\frac{h}{R(R+h)}$ donde M_T es la masa de la Tierra y R el radio terrestre. Como la distancia del florero al piso es muchísimo menor que el radio terrestre, de unos seis mil kilómetros, tenemos que $R(R+h) \cong R^2$ Por lo que la ecuación nos queda: $E_g = G\frac{M_Tm}{R^2}h$ Pero téngase en cuenta que $G\frac{M_T}{R^2}$ es la aceleración de la gravedad en la superficie de la tierra. Por lo tanto, tenemos: $E_g = G\frac{M_T}{R^2}mh = mgh$ que es el cálculo que hicieron nuestros alumnos.

Al hablar del campo gravitatorio dijimos que, por razones geométricas, la fuerza gravitatoria externa en torno a un cuerpo esférico no depende de que la masa esté distribuida homogéneamente en todo el cuerpo, o que esté concentrada en su centro. En Júpiter, por ejemplo, que es un inmenso planeta gaseoso, varía enormemente su densidad desde la superficie gaseosa del planeta al núcleo solidificado por la presión de la gravedad, pero la fuerza de gravedad en su superficie se puede calcular simplemente por la masa total y la distancia al centro. Por ese motivo, se puede calcular con mucha exactitud el efecto gravitatorio de una galaxia en forma de nube esférica como si toda la masa de sus estrellas estuviera concentrada en el centro geométrico. Pero es muy distinto el caso si uno se mete dentro del radio de la esfera, pues pueden contrarrestarse los efectos: si uno se acercara al centro donde se concentra toda la masa, la fuerza gravitatoria sería intensísima, mientras que si uno se acerca al centro de un cuerpo de masa distribuida, la fuerza gravitatoria se anula.

Por aquí entendemos que, aunque desde el punto de vista de la fuerza gravitatoria exterior no hace diferencia cuán concentrada esté la masa, desde el punto de vista de la energía gravitatoria este aspecto es fundamental. Porque mientras más concentrada esté la masa, mayor trabajo toma separar una parte a la misma distancia del centro, o diciéndolo en los términos de nuestra ecuación, la concentración es la que determina el radio que hay que tener en cuenta en el cálculo de la energía:

$$E_g = Gm_1m_2(\frac{1}{R} - \frac{1}{x}) = G\frac{m_1m_2}{R}(1 - \frac{R}{x})$$

Si la Tierra tiene un radio de incorporación de 6.000 km, la energía máxima de un florero enviado al espacio exterior (x mucho mayor que R) es $E_g = G\frac{M_Tm_f}{6\ 10^6m}$ Pero si la masa de la tierra estuviera concentrada en una esfera de 6 m, la energía gravitatoria del florero sería un millón de veces mayor. Y tengamos siempre en cuenta que – no somos relativistas – la energía es una *cualidad real* entre los cuerpos con masa.

3º Energía gravitatoria de múltiples cuerpos

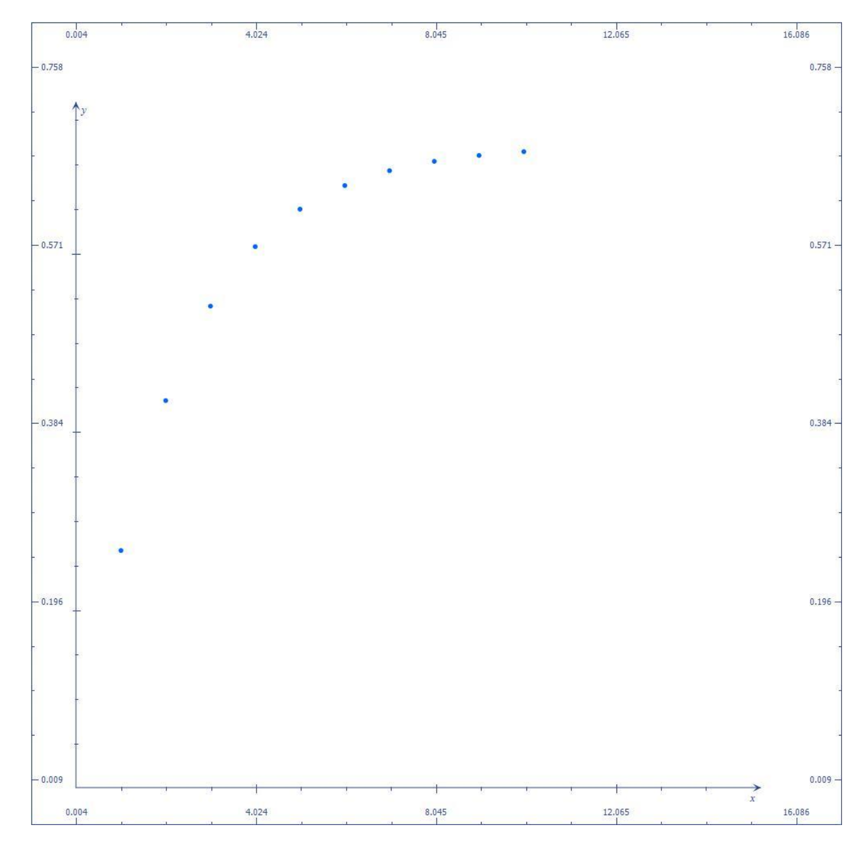
Supongamos que el universo es inicialmente una gran gota de agua en el espacio e intentemos calcular cuál es la energía gravitatoria máxima que se podría alcanzar por separación de partes. Llamemos *m* a la parte que se separa del cuerpo de masa total *M*, de modo que la parte que queda es (M – m). Por lo tanto, la ecuación de energía gravitacional máxima queda: $E_g = G\frac{(M-m)m}{R}$ Es fácil ver que el producto es máximo cuando $m = \frac{M}{2}$ es decir, cuando el cuerpo se separa en dos mitades. En ese caso nos queda: $E_g = G\frac{1}{R}(\frac{M}{2})^2$ Vemos que la energía gravitatoria depende más de la magnitud de la masa que de la pequeñez del radio. Para una esfera de densidad d, la masa total es: $M = \frac{4}{3}\pi R^3 d$ Si la reemplazamos en la ecuación de la energía (simplificando $\frac{\pi}{3} \cong 1$ para no complicarnos la vida), tenemos: $E_g = 4Gd^2R^5$ La energía total depende mucho más del tamaño del cuerpo que de su densidad. Para que un cuerpo alcance, al separarse en dos partes, la misma energía gravitatoria que un cuerpo de doble radio, tendría que tener una densidad ocho veces mayor.

Volvamos a nuestro problema. Ahora podemos separar por *segunda* vez las dos mitades de la gran gota en otras dos partes cada una, con lo que se sumaría un doble aumento de energía gravitacional, que se calcula de manera semejante: $E_{g2} = 2G\frac{1}{R_2}(\frac{M}{2.2})^2$ R2 es el radio de las nuevas gotas de media masa, que quedan después de la primera separación. Como las gotas en el espacio siempre toman forma esférica, no es difícil calcularlo en relación al radio del gotón inicial, porque la masa de la nueva esfera debe ser igual a la mitad de la masa de la esfera inicial:

$$\frac{4}{3}\pi R_2^3 d = \frac{\frac{4}{3}\pi R^3 d}{2} \;\rightarrow\; R_2 = \frac{R}{\sqrt[3]{2}}$$

Si ahora seguimos este procedimiento por 3ª y 4ª vez, y así siguiendo n veces hasta la división de la gran gota en moléculas de agua separadas gran distancia entre sí, tendremos la máxima energía gravitatoria posible. Si se pone atención, se ve que los miembros que se van sumando a la energía con la separación n, responden a la ecuación: $E_{gn} = 2^{n-1}G\frac{\sqrt[3]{2}^{n-1}}{R}(\frac{M}{2^n})^2$ Como la energía total sería la suma de la que aparece con cada división, tenemos:

$$E_g = \sum_1^\infty E_{gn} = G\frac{M^2}{R}\sum_1^\infty \frac{2^{n-1}\sqrt[3]{2}^{n-1}}{2^{2n}} = G\frac{M^2}{R}\sum_1^\infty 2^{n-1}.2^{\frac{n-1}{3}}.2^{-2n} = G\frac{M^2}{R}\sum_1^\infty 2^{-\frac{2}{3}(n+2)} = G\frac{M^2}{R}\sum_1^\infty \frac{1}{\sqrt[3]{2}^{2(n+2)}}$$



n			$\sum$
1	$\frac{1}{\sqrt[3]{2}^6} = \frac{1}{2^2}$	0.25	0.25
2	$\frac{1}{\sqrt[3]{2}^8}$	0.1575	0.4075
3	$\frac{1}{\sqrt[3]{2}^{10}}$	0.09921	0.5067
4	$\frac{1}{\sqrt[3]{2}^{12}} = \frac{1}{2^4}$	0.06250	0.5692
5	$\frac{1}{\sqrt[3]{2}^{14}}$	0.03937	0.6086
6	$\frac{1}{\sqrt[3]{2}^{16}}$	0.02480	0.6334
7	$\frac{1}{\sqrt[3]{2}^{18}} = \frac{1}{2^6}$	0.015625	0.6490
8	$\frac{1}{\sqrt[3]{2}^{20}}$	0.009843	0.6588
9	$\frac{1}{\sqrt[3]{2}^{22}}$	0.006201	0.6650
10	$\frac{1}{\sqrt[3]{2}^{24}} = \frac{1}{2^8}$	0.00390625	0.6690

Tenemos una sumatoria de términos cada vez más pequeños que se ve que tiene un límite inferior a tres veces la energía de la primera separación. Si separamos cuatro veces la masa inicial (en 16 partes), llevando las partes a una distancia de cuatro radios cada vez, ya tenemos más del 60% de la energía gravitatoria máxima.

4º La paradoja de la energía gravitatoria

Con lo que llevamos dicho, salta a la vista una cierta paradoja. Si al pasar nos encontráramos con un universo vaporoso de n moléculas de agua separadas entre sí, o si se quiere, con un cúmulo de n estrellas, cuya masa bien contada suma M, no podríamos saber cuál es la energía gravitatoria que se invirtió en producirlo, y por lo tanto la que existe en él y la que puede devolver, si no nos dicen cuál fue el estado inicial del que se partió. En particular, tendrían que decirnos qué tan condensada estaba toda esa masa en la condición inicial, o sea, cuál era su radio R de incorporación natural.

Un físico *matemático-relativista* no se hace problema. Calcula el estado gravitacional de la nube, según la masa de cada partícula y las distancias relativas entre ellas, y si se expande dice que absorbe energía (si tuviera cierta energía cinética a modo de calor, la nube se enfriaría), mientras que si se comprime, calcula cuánta energía gravitatoria entrega. De manera que, si el universo se concentra en una minúscula gotita, el físico relativista nos puede calcular a qué temperatura se encuentra, pues toda la energía gravitatoria perdida se tiene que haber convertido en energía cinética. ¿Dónde está el problema?

El problema lo tiene el físico *entitativo-absolutista*, para el cual la energía es una cualidad real, potencia activa, que tiene cierta entidad determinada. Él sí se pregunta cuál era el estado inicial natural, natural al menos desde el punto de vista de la pura corporeidad, porque si el estado natural de la nube es una gran gota de agua de cierto radio, la energía gravitatoria universal que se halla distribuida entre las moléculas es una, pero si es una gota de radio 10 veces menor, la energía total es 10 veces mayor. Si la energía gravitatoria es *algo*, no puede no importar que este algo sea 10 veces mayor. Si habláramos de la energía cinética de una piedra que nos cae en la cabeza sí nos importaría, y si habláramos de la energía química de la pólvora de la bala que nos disparan, también nos importaría si es 10 veces mayor o menor. Al físico, el menos, debería importarle este aspecto de la realidad.

Más debería importarnos cuando los físicos barajan teorías como las del Big bang, según las cuales el universo habría empezado con una desmesurada concentración de su masa. Si la masa del universo, que por lo que se puede observar no es pequeña, pudo integrarse en una enorme estrella de neutrones, cuya densidad es altísima, una es la energía gravitatoria distribuida en los cuerpos celestes del espacio. Pero si la naturaleza permite que la densidad sea inmensamente mayor, como pretende la física cuántica, muy otra sería la energía gravitatoria distribuida, sea lo que ésta sea y esté donde esté.

Esto sea dicho considerando el universo en general, pero la paradoja se mantiene al considerar cada parte en particular. Porque vimos que la energía gravitatoria disminuye muy rápidamente con la distancia en proporción al radio mínimo de incorporación, de manera que, a varios radios de la tierra, ya es muy poco lo que varía la energía gravitatoria por la mayor o menor separación. Este es uno de los problemas que afectan a los astrónomos que quieren explicar los vínculos entre las estrellas por la atracción gravitatoria: están tan lejos, por comparación al radio de cada estrella, que sus influencias gravitatorias son demasiado pequeñas como para explicar satisfactoriamente su vinculación. Y lo mismo debe aplicarse a las partículas de un núcleo de hidrógeno. Las masas del neutrón y del protón son debilísimas, por lo que poco a nada se siente la fuerza de atracción gravitatoria. Pero en cuanto a la energía gravitatoria que encierran, depende en realidad del radio natural de incorporación. Porque si la masa del núcleo pudiera condensarse en dimensiones un millón de veces menores que el diámetro del núcleo, de manera que ese fuera el radio de incorporación, tendrían una desvinculación gravitatoria, al estar tan lejos del radio de incorporación, pero la energía gravitatoria no sería en realidad tan pequeña como la débil masa haría pensar.

5º Conclusión

Vistas así las cosas, queda claro que la energía gravitacional, al igual que la energía cinética, no es algo que resulte de la masa de los cuerpos, sino que le es dada a los cuerpos por un agente exterior (exterior al menos al fenómeno de la gravitación) que hace el trabajo de separar los cuerpos. El que separa los cuerpos es como el arquero que tensa el arco y le confiere la energía elástica (potencia activa) capaz de impulsar la flecha. En este caso lo que se confiere es la energía gravitatoria capaz de impulsar un cuerpo hacia el otro. Por eso Santo Tomás,

siguiendo a Aristóteles, siempre dice que el motor (causa eficiente con potencia activa) que impulsa los cuerpos graves a sus lugares naturales es el *generante*, es decir, es el que genera la situación de separación de los cuerpos[1].

Aquí también, y más claramente que para el movimiento inercial, se hace patente que no se puede dar razón de la energía gravitatoria sin tener en cuenta el medio que une los cuerpos, que se comporta a la manera de un medio elástico. Esto merece una consideración especial.

II. LA FUNCIÓN DEL MEDIO EN EL MOVIMIENTO GRAVITATORIO

1º Renovada imagen de los cuerpos graves

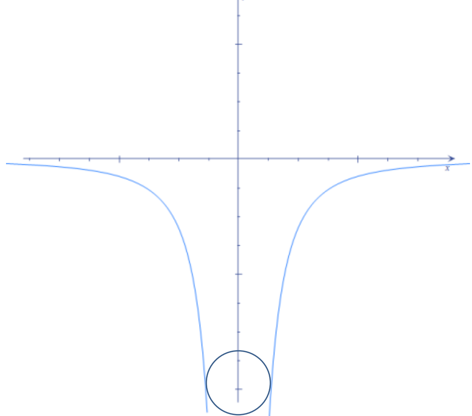
El fenómeno gravitatorio se las trae, pues a la hora de buscar las causas eficientes de sus movimientos, éstas se nos esconden. La gravitación hace que todos los cuerpos cercanos a un cierto cuerpo sufran una aceleración hacia éste proporcional a su masa, que no depende de las masas de los cuerpos que se le acercan. Esta aceleración supone la aparición y aumento de energía cinética en los cuerpos atraídos, lo que implica la presencia de un agente cinético que se las confiere. Newton nos dice que se está haciendo una fuerza sobre los cuerpos, y que por eso se aceleran. Pero ¿quién hace dicha fuerza? Si guardamos en el espíritu la imagen moderna de los cuerpos, en que éstos se reducen a la extensión con masa y se separan por un espacio vacío que no es nada ni hace nada, no parece posible responder a esta pregunta. La fuerza de gravedad *se hace*, pero *nadie la hace*. Vimos que no puede atribuirse al cuerpo hacia el que los otros se aceleran, por más que la aceleración dependa de su masa, porque dicha acción supone la misteriosa energía gravitatoria, que no puede atribuirse a ninguno de los cuerpos involucrados, a diferencia de la energía cinética.

Tenemos que renovar la imagen de los cuerpos naturales, como se dijo más arriba, para conservarnos en el realismo ontológico y causal, único que guarda la cordura del espíritu. En primer lugar, se ve que los cuerpos, en cuanto tales, tienden a estar incorporados (unidos) y quietos, de modo que la energía cinética que tienen por estar en movimiento, así como la energía gravitatoria que tienen por estar separados, les ha venido por la acción de algún agente externo, externo al menos al fenómeno que consideramos[2]. Además, hay que tener en cuenta que son extensos, y que toda extensión es parte de la corporalidad, de modo que no hay que imaginarlos como entes másicos en el no-ente vacío, sino como extensiones con partes densas y partes sin densidad, yema y clara del huevo del que hablamos más arriba. Así vistos, cabe entender que la energía gravitatoria resida en las propiedades o geometría de las claras vacías de cada cuerpo, constituidas en razón de la separación de las yemas másicas, y podemos atribuir a dichas partes las fuerzas que se aplican. Parece que la gravedad puede entenderse como si fuera una propiedad elástica del espacio propio de cada cuerpo, o también, de manera más geométrica, como si fuera una pendiente de dicho espacio que inclina los cuerpos. Analicemos cada enfoque.

Vínculo elástico. Podemos pensar los cuerpos como huevos con clara elástica, en la que se distribuye la energía gravitatoria de atracción según la manera como hayan sido separados de la situación de unión inicial. Vimos que la energía acumulada entre dos cuerpos que se separan viene dada por la ecuación:

$$E_g = Gm_1m_2\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{x}\right) = G\frac{m_1m_2}{R}\left(1 - \frac{R}{x}\right)$$

Para x = R la ecuación da cero. R es la distancia de unión o incorporación, y x es la separación que tienen los cuerpos, siempre mayor que R. Mientras mayor es la separación, hay más energía gravitatoria, pero esta se concentra sobre todo en las cercanías de los cuerpos, pues apenas la distancia de separación se hace varias veces R, ya es muy poco lo que sigue creciendo. Es claro también que se concentra más en torno a las partes de mayor masa, pero siempre en dependencia de las partes separadas, porque si no se separó ninguna masa, no hay energía gravitatoria y, como vimos, si se separó una masa pequeña hay poca, mientras que si se separaron mitad y mitad, hay máxima.

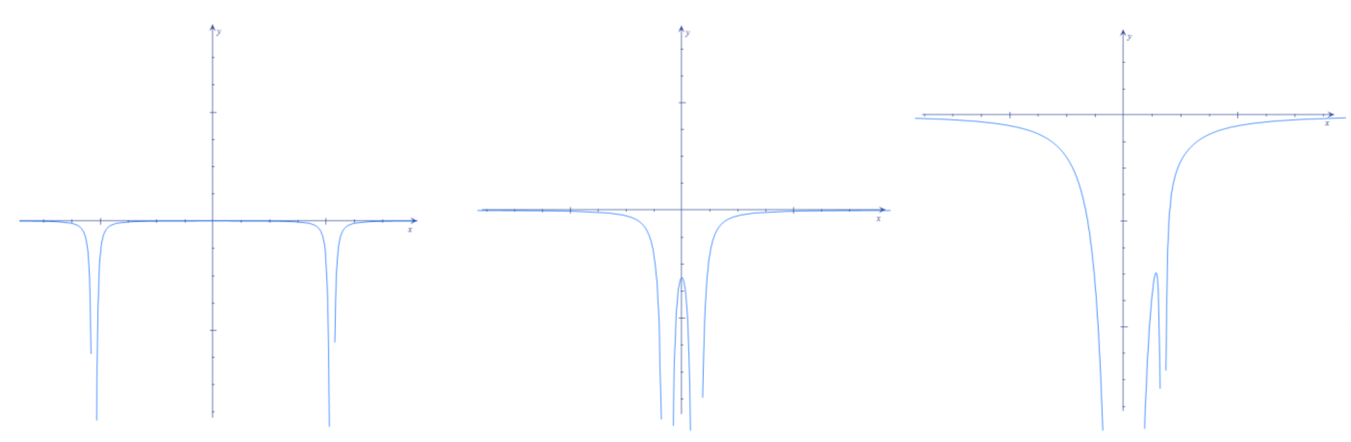


[1] Cf. *In VIII Physicorum*, lect. 8, Marietti, n. 1035.

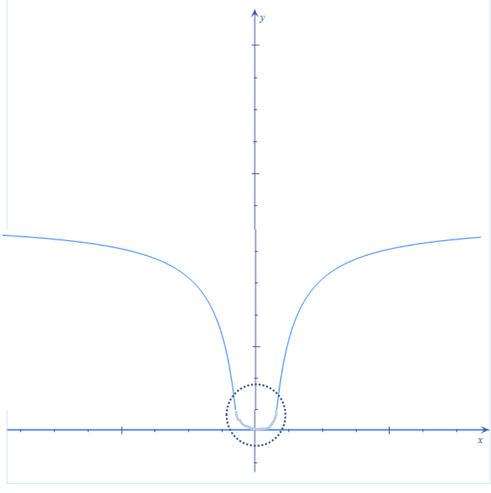
[2] Puede explicarse el fenómeno del movimiento y la separación por la aparición de fuerzas repulsivas, como las eléctricas. Una partícula de masa neutra (un neutrón) se divide en un protón y un electrón, que se repelen con energía. ¿De dónde sale esta energía? Según la física moderna, que en este punto sigue siendo aristotélica (pues el principio de conservación de la masa-energía responde al principio de causalidad), hay una pérdida de masa que se transforma en energía cinética. Hay que analizar estas cosas en buena filosofía.

Aquí tenemos que tener en cuenta la paradoja de la gravitación. La distribución de la energía gravitatoria en el espacio en torno a cada cuerpo depende, en su realidad absoluta, tanto de la distribución de masas en el universo corporal, como del radio natural de incorporación desde el cual debe calcularse la energía de separación. Así como no sabríamos cuál es la energía elástica de un resorte extendido si no nos dicen cuál es su extensión natural, porque no es lo mismo haber extendido a dos metros un resorte cuyas espiras están en equilibrio a un metro, que haber extendido a dos metros un resorte con las mismas espiras que se equilibran a un centímetro, así tampoco sabemos cuál es la energía gravitatoria real de un cuerpo en el universo, si no sabemos cuál es la incorporación natural que le es propia respecto de los cuerpos que lo rodean.

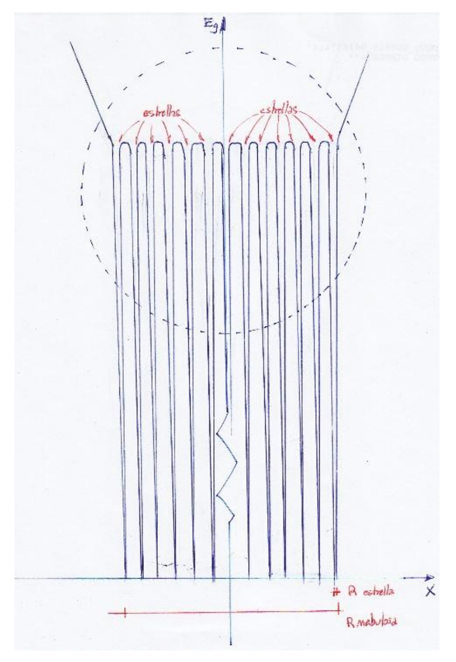
Pendiente. Podemos expresar lo mismo con una analogía más geométrica, entendiendo la energía gravitatoria a modo de una pendiente del espacio hacia los centros de masa. Cada cuerpo provoca una especie de depresión o pozo en su espacio, de tal manera que los cuerpos que se le acercan resbalan por su pendiente hacia su centro de masa con una aceleración que depende de la masa y del cuadrado de la distancia (graficamos lo ocurre para cualquier dirección radial a partir del centro de masa). Cuando tenemos dos cuerpos de igual masa a varios radios de distancia, no tienen mayor influencia entre sus respectivas depresiones, pero si se acercan se suman sus efectos. Y si uno tiene mucho mayor masa que el otro, lo absorbe en su pendiente (graficamos los tres casos).



En los gráficos siempre aparecen discontinuidades porque se suponen las masas concentradas en un punto, por lo que en su cercanía la pendiente (que equivale a la fuerza de atracción $F = \frac{\partial E}{\partial x}$) siempre tiende a infinito, pero en realidad la masa se halla distribuida en cierta extensión.



Aquí también todo depende del radio de incorporación. La fuerza gravitatoria en torno a una nebulosa se ejerce, según dijimos, como si toda su masa estuviera concentrada en su centro. Si estuviera compuesta de polvo estelar con una distribución que no puede comprimirse más (supongamos que por causa de las fuerzas electromagnéticas, si se trata de gas ionizado), a la distribución externa de energía – dada por la ecuación referida – habría que agregar un pequeño aumento por las fuerzas gravitatorias internas, que tienden levemente a llevar un cuerpo al centro geométrico de la nebulosa (ver gráfico). Pero si la nebulosa es en realidad un cúmulo globular de estrellas, cuyo estado de unión natural fuera una única gran estrella de densidad semejante a las demás, la fuerza gravitatoria externa es idéntica (como si la masa se concentrara en el centro), pero la energía gravitatoria tiene un valor absoluto muchísimo mayor, pues éste depende del radio de incorporación (millones de veces menor). Y la distribución de la



energía interna también sería muy distinta, pues se concentra en torno a los puntos densos de las estrellas (ver gráfico, que amplía la región marcada en el gráfico anterior).

2º Realismo del campo gravitatorio

El concepto de la física moderna que mejor corresponde con estas ideas es el de *campo*. El físico moderno pretende que el campo es sólo una noción matemática útil, aunque se ve cada vez más constreñido a reconocerle cierta realidad, como de hecho Faraday insistía en atribuirle. Nosotros sostenemos la necesidad, impuesta por el principio de causalidad, de reconocerle su realidad y función. La energía es potencia activa en orden al movimiento local que requiere un sujeto corporal, es decir, extenso, y se aplica necesariamente por contacto corporal. La energía gravitatoria que causa el movimiento de acercamiento de dos cuerpos separados se distribuye en el espacio entre ambos cuerpos, a modo de campo (piénsese como campo elástico o de pendientes), es decir, más intensamente en las cercanías de los centros de masa y con rápida disminución al alejarse, causada por el agente que produjo la separación.



Cometa Halley

El cometa Halley reaparece aproximadamente cada 76 años. Esta fotografía, tomada en Nueva Zelanda en 1986, muestra al cometa durante su aproximación al Sol más reciente. El cometa se hace visible porque la radiación solar vaporiza partes del núcleo de hielo, formando la cabellera y la cola del cometa.

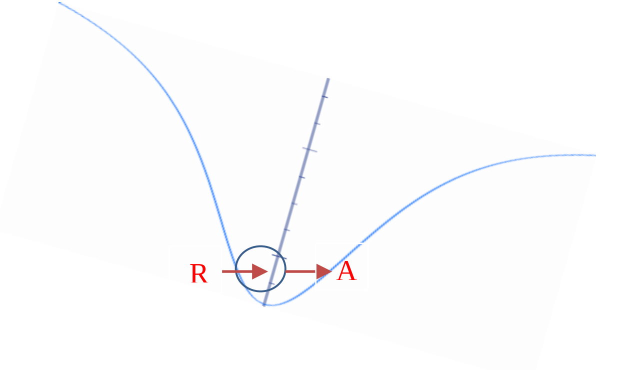
Como se ve hasta ahora, no cambiamos las matemáticas de la Física moderna, sino sólo sus conceptos, volviendo al realismo ontológico y causal. Señalemos, por dar un ejemplo, un aspecto de la gravedad que podemos entender mejor. Dijimos que para acelerar un cuerpo de manera constante empujándolo, hay que hacer una inversión de energía cada vez mayor, y que no hay motor que aguante acelerar mucho rato, porque tiene que seguir aplicando la misma fuerza cada vez a mayor velocidad. Sin embargo observamos que el Sol acelera por años al cometa de Halley sin moverse ni transpirar. ¿Por qué el Sol puede empujar sin tener que correr detrás? Porque no es él quien empuja. Al cometa lo empujan las líneas que lo unen al Sol, que son como resortes extendidos o largas pendientes, de los que cada metro le da su empujoncito por contacto inmediato, y que mientras más rápido los recorre, más metros van obrando por unidad de tiempo.

III. La función del medio en el movimiento inercial

1º Una hipótesis sencilla

Donde más tenemos que renovar concepciones es, para desdicha de la Física, en el asunto más primordial: el movimiento de inercia. Como dijimos, los nuevos físicos se sintieron genios al comprobar que un cuerpo conserva su movimiento en el espacio, y se creyeron absueltos del deber de dar explicación causal de dicho movimiento. Se mueve y ya. Pero esto no habla bien de ellos, por lo que tienen que volver a Aristóteles para pedirle disculpas por sus necios desprecios y aprender un poco más del gran griego.

Si un cuerpo que ha recibido un impulso conserva su movimiento, es porque algo lo continúa moviendo, y se hace evidente, por lo dicho, que lo que lo mueve es el reflujo de su propia influencia sobre el medio. Lo que más simple e inmediatamente se podría pensar – y no siempre las ideas más simples son las más descabelladas – es que, si un cuerpo estático provoca en torno de sí una especie de depresión que es capaz de mover los demás cuerpos hacia su centro (fenómeno gravitatorio), cuando es impulsado en cierta dirección (fenómeno inercial), su influencia depresora varía en dicha dirección, como inclinando hacia ella el eje de simetría de su influencia en el medio (A: acción), y la variación de la depresión lo inclina hacia un nuevo equilibrio, de la misma manera y por la misma razón que la gravedad atrae los cuerpos (R: reacción). La reacción del medio perpetúa el impulso inicial, provocando un avance de la depresión en la dirección del impulso, y provocando la prolongación de la reacción. De esta manera se podría explicar que se conserve el impulso por la ola depresora que se forma en el espacio quieto, en la que hace surf la parte másica.

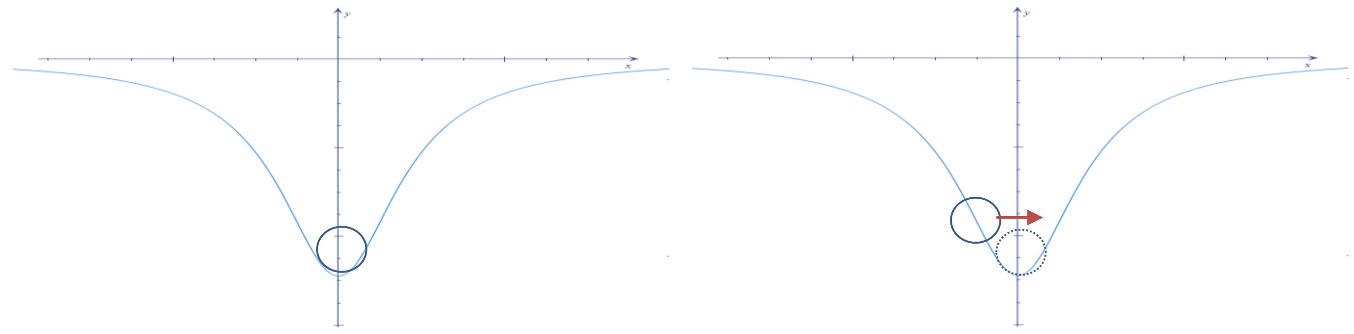


Este fenómeno de inercia es, entonces – como ya se sabe –, un acumulador de energía. Si la parte másica recibe un nuevo impulso exterior, aumenta su velocidad, y aumenta por lo tanto la asimetría de su influencia en el medio, que le permite conservar esta velocidad mayor. Cuando un cuerpo es atraído por la gravedad de otro, como el cometa Halley por el Sol, al impulso por la energía gravitatoria del Sol que se haya como distribuida a lo largo de las líneas de campo, como dijimos, se le va sumando la propia modificación del espacio en la dirección de su movimiento, por lo que acumula la energía gravitatoria en energía cinética.

Algo así tiene que ocurrir, porque *nada se mueve si no es movido por otro*. Pero ¿es posible pensar que el fenómeno que conserva el movimiento por inercia sea el mismo de la gravedad?

2º Objeción principal

La tentativa de explicar la inercia por la gravedad tiene el atractivo de la simplicidad, pero tiene que hacer frente a una grave objeción: el fenómeno gravitatorio es demasiado débil (la constante G es demasiado pequeña) para justificar la conservación del movimiento de los cuerpos. Sabemos calcular la energía cinética de un cuerpo en movimiento. Ahora bien, si suponemos que esta energía se conserva por cierta tensión entre el estado real de un cuerpo y un centro virtual como de atracción gravitatoria desplazado hacia adelante en la dirección del movimiento, para que esta explicación camine la energía cinética tendría que ser del mismo orden que dicha virtual energía gravitatoria.



Porque estamos entendiendo el movimiento inercial como un pulso gravitatorio, con movimiento ondulatorio como se da en el pulso de una cuerda o de un resorte. En el pulso de una cuerda o de un resorte hay una cierta *energía transferida* a lo largo de la cuerda o del resorte, que es la implicada en la deformación del pulso, que viaja a una cierta velocidad v. Si nos ubicamos en un punto de dicha línea, vemos que éste va siendo elevado o desplazado hasta alcanzar un grado máximo de desplazamiento, y luego decae hasta volver a la posición inicial. Por lo tanto, si le preguntamos cuánta energía pasó por él, nos dirá que lo más que vio fue cuando estaba en la cima de su progreso, esto es, en el desplazamiento máximo. Ésta es, entonces, la energía que se está transfiriendo. En el pulso gravitatorio sabemos que la energía transferida por una masa en movimiento es $E = \frac{1}{2}Mv^2$ Esta energía, entonces, debe ser igual a la energía de desdoblamiento gravitatorio máximo que atribuimos a dicha masa en cada punto, lo que no es muy claro cómo podría calcularse.

Dada la debilidad de la fuerza gravitatoria, es claro que nunca podríamos explicar la energía cinética por la energía gravitatoria para cuerpos con densidades como las que nos parece encontrar a nuestro alrededor. En la ecuación de energía: $E_g = G\frac{m_1 m_2}{R}(1 - \frac{R}{x})$ parece que tendríamos que tener en cuenta dos veces la misma masa, porque sería a la vez la masa (virtual) que atrae y la masa (real) atraída, y x sería lo que llamamos el desdoblamiento virtual, al que supondremos máximo (x mucho mayor que R), con lo que nos queda: $E_{gmax} = G\frac{M^2}{R}$ Esta energía gravitatoria tendría que dar razón de la energía cinética: $\frac{1}{2}Mv^2 = G\frac{M^2}{R}$ Pero si ponemos números podemos darnos cuenta qué lejos estamos de haber explicado algo. Para un cuerpo esférico cuya masa fuera 1 kg y su densidad como la del agua (1 kg/dm^3), tendríamos R = 0,06 m. En ese caso, la velocidad máxima que podría justificar su energía gravitatoria sería: $v = \sqrt{2G\frac{M}{R}} = \sqrt{2 \times 6.7\ 10^{-11} \times \frac{1}{0.06}}\frac{m}{sg} = 4.7\ 10^{-5}\frac{m}{sg}$ Y para que nuestra hipótesis camine ¡tendría que explicar velocidades con un máximo en la velocidad de la luz, que parece ser la máxima velocidad natural! La relación, entonces, entre masa y radio de incorporación (que tiene que ver con la densidad) tendría que ser:

$$\frac{M}{R} \geq \frac{c^2}{2G}$$

Donde c es la velocidad de la luz en m/sg. Es decir:

$$\frac{M}{R} \geq \frac{9 \times 10^{16}}{2 \times 6.7\ 10^{-11}} \frac{kg}{m} = 7 \times 10^{26} \frac{kg}{m}$$

Parece absolutamente ridículo. Pero, ¿qué hay que entender como *radio de incorporación*? Pues vimos que este punto es crucial.

3º Posible existencia de una solución

El radio de incorporación es la distancia mínima a la que puede ser comprimida naturalmente la masa de una partícula, a partir del cual se debe comenzar a calcular la energía gravitatoria de separación. Ahora bien, se sabe que, en las substancias naturales, las regiones con densidad de masa están extremadamente concentradas, pues la masa de nuestra gota de agua se haya concentrada en los núcleos de oxígeno e hidrógeno, que son proporcionalmente muy pequeños. Y se ha descubierto que los mismos núcleos, a su vez, tienen su masa concentrada en sub-partículas, los quarks, extremadamente pequeños respecto de las dimensiones del núcleo. Por lo tanto, las posibilidades de concentración de la masa de una gota de agua están más allá de todo límite conocido por la Física hoy en día. Y como la fuerza gravitatoria es la única capaz de sumar sus efectos a distancia, también se sabe que puede vencer, en cuerpos de gran masa, la resistencia de todas las otras fuerzas (electromagnéticas y nucleares) que conservan la estructura extensa de la materia. Por lo que los físicos hoy aceptan como posibilidad natural el que las dimensiones de una gota de agua puedan reducirse a algo infinitesimal, más allá de todo lo mensurable.

Si volvemos ahora a nuestro pequeño cálculo de la energía gravitatoria de una masa dividida n veces, que nos dio como resultado $E_g \cong 3\ G \frac{M^2}{R}$ y tenemos en cuenta que R puede ser algo extremadamente pequeño, está permitido pensar que la energía gravitatoria invertida en cada partícula que compone la nubecita de nuestra gota de agua, no es algo despreciable, y puede justificar su vibración en el espacio elástico y su movilidad.

Por supuesto que no puede darse mayor importancia a nuestros cálculos, porque en las regiones de dimensiones tan pequeñas no se sabe cuáles son exactamente las leyes físicas. Como nota curiosa, leemos en una obra de divulgación científica, al tratar de las teorías que intentan unificar las leyes que rigen las diversas fuerzas físicas:

"Aún no sabemos si tiene sentido una Gran Unificación como la mencionada antes, pero mientras se aclara esta duda podemos preguntarnos si la gravedad podría entrar en algún esquema de unificación. ¿Quizás exista una temperatura arriba de la cual las interacciones fundamentales de la naturaleza se encuentran unificadas? Esto, hasta ahora, es una especulación. El principal escollo es que no tenemos ninguna idea clara de cómo se comporta la gravedad a nivel cuántico. Para ubicar el problema veamos cuáles son los límites de la relatividad general. Para ello, recordemos que las dos constantes fundamentales que entran en esta teoría son *G*, la constante de Newton, y *c*, la velocidad de la luz. En una teoría cuántica de la gravitación, sea cual fuere su forma, tendría que aparecer también otra constante fundamental para incluir los efectos cuánticos: ésta sería *h*, la constante de Planck. *G*, *c* y *h* son las tres constantes fundamentales de la naturaleza y sus valores se han determinado experimentalmente. El mismo Planck se dio cuenta de que es posible combinarlas entre sí para obtener unidades de longitud, tiempo y masa. En efecto, la combinación: $\sqrt{\frac{hG}{c^3}}$ tiene unidades de longitud y vale unos 10^{-33} centímetros; del mismo modo, la combinación: $\sqrt{\frac{hG}{c^5}}$ tiene unidades de tiempo y equivale a unos 5 x 10^{-44} segundos[1]; por último, la combinación: $\sqrt{\frac{hc}{G}}$ tiene unidades de masa y vale unos 5 x 10^{-5} gramos. La longitud y el tiempo de Planck son las unidades naturales de un nivel de realidad aún desconocido, muchísimo más pequeño que el mundo cuántico. Para tener una idea sencilla: el tamaño más común de un átomo es de unas 10^{25} longitudes de Planck. En el mundo de Planck, la fuerza gravitacional vuelve a ser de fundamental importancia: los fenómenos cuánticos y gravitacionales se relacionan íntimamente entre sí, y ni la mecánica cuántica ni la relatividad general son válidas por sí solas"[2].

---

[1] La edición que tenemos trae $\sqrt{\frac{G}{hc^3}}$ para la longitud de Planck y $\sqrt{\frac{G}{hc^5}}$ para el tiempo, pero se trata evidentemente de un error. El valor para la longitud es 4 10^{-35} m y para el tiempo 1.34 10^{-43}. La masa sí nos da 5.5 10^{-8} kg.

[2] Shahen Hacyan, *Del mundo cuántico al universo en expansión*, «La ciencia para todos» 129, Fondo de Cultura Económica, primera edición electrónica México 2013, p. 57-58.

El valor de las tres constantes mencionadas es:

$$G = 6.672\ 10^{-11}\ \frac{m^3}{kg\ sg^2} \qquad c = 2.998\ 10^8\ \frac{m}{sg} \qquad h = 6.625\ 10^{-34}\ \frac{kg\ m^2}{sg}$$

Se hace interesante observar que la relación entre la masa y la longitud de Planck responde a lo que se exige para explicar la inercia por la gravitación: $\frac{M_{Planck}}{R_{Planck}} = \sqrt{\frac{hc}{G}\ \frac{c^3}{hG}} = \frac{c^2}{G}$ Pero de todo esto lo único que queremos concluir es que la objeción de la debilidad de la fuerza gravitatoria no es insalvable, y no necesitamos más.

4º Inercia y gravedad son dos aspectos de lo mismo

Nuestra experiencia científica nos permite instalarnos pacíficamente, sin más investigación, en la sencilla posición que entiende inercia y gravedad como dos aspectos de una misma relación entre la masa y el espacio vacío. Aquí nos plantamos hasta que se nos demuestre lo contrario – desafío no muy temerario porque existimos sin adversarios –. Nuestra formación filosófica nos lleva a confiar un poco más en la razón de lo que lo hacen los físicos modernos, que no se sienten habilitados a afirmar más que aquello que se demuestre con matemáticas y laboratorio. Repasemos los fundamentos de nuestra posición.

Primero. El principio de causalidad exige explicar el movimiento inercial como lo hizo Aristóteles, por acción y reacción con el medio. Ésta es la razón primera y principal. Consideramos el movimiento inercial como un hecho manifiesto, pero admitirlo sin más, como que algo se mueve por sí mismo, es admitir un cambio sin causa, lo que supone la renuncia a la inteligencia científica. La ciencia es un conocimiento por las causas, y el científico es el experto en hallarla – a esto nos referimos al hablar de nuestra experiencia científica, no a años de laboratorio –. En este punto Aristóteles es el mayor genio físico de la humanidad, por lo que coincidir con su sentencia suma extrema solidez a nuestra evidencia: no hay otra manera de explicar el movimiento inercial que por acción y reacción con el medio.

Segundo. Dicho medio existe, y ya sabemos que no es el aire sino el vacío. Entender el vacío como Demócrito es una renuncia a la inteligencia aún mayor que la del movimiento sin causa, porque supone admitir extensión sin substancia. Los físicos modernos se ven obligados a reconocerle mil propiedades al vacío y persisten, en absoluta incoherencia, en negar su realidad: es consecuencia de su renuncia al ente, objeto de la inteligencia.

Tercero. La acción y reacción con el medio supone fuerza y energía, y la manifiesta relación entre inercia y gravedad reclama que sea la fuerza y energía gravitatoria la que explique el movimiento de inercia. Hoy, cuando podemos ver a los astronautas flotar con todas sus cosas en una aparente gravedad cero, hay que poner la conexión entre inercia y gravedad entre los hechos manifiestos a la experiencia sensible.

Cuarto. La gran objeción contra la explicación reclamada por hechos tan notables, es que la fuerza que explique el movimiento inercial por reacción con el medio tiene que ser fortísima, mientras que la fuerza de gravedad se manifiesta debilísima. Pero esta objeción cae ante las maravillas que pone en evidencia la investigación física de las dimensiones mínimas, que muestra cómo la masa se halla concentrada en puntos de densidad inimaginable.

Quinto. Entre todas las demás fuerzas físicas, nucleares y electromagnéticas, la fuerza de gravedad es la más universal, como es universal el fenómeno de inercia; es la fuerza que depende exclusiva y simplemente de la masa de los cuerpos, al igual que la inercia; es la fuerza de la que se ve depender en cierta manera la misma geometría del espacio, que tan estrechamente se vincula que las leyes de la inercia; y es la fuerza que termina triunfando sobre todas las otras en los cuerpos de gran masa, es decir, es la única que permanece cuando desaparecen todas las demás. ¿Acaso hace falta más para que el físico se felicite de haber percibido la causa inmediata del escondido fenómeno de inercia?

En síntesis. En la extensión de las substancias naturales hay partes casi puntuales de masa sumamente condensada y grandes espacios vacíos, cuya propiedad fundamental, que podemos llamar campo gravitatorio, se ve depender de la distribución de masas. Este campo gravitatorio, que se puede entender a modo de una depresión o deformación elástica, explica tanto el acercamiento gravitatorio de masas diversas, como la permanencia inercial del movimiento de una misma masa, por un proceso ondulatorio de acción y reacción con el espacio vacío.

La vibración del espacio vacío que justifique el movimiento de un cuerpo supone un campo elástico de energía proporcionalmente muy alta, cuyas variaciones correspondan a la energía cinética del cuerpo. En nuestra experiencia ordinaria la densidad promedio de los cuerpos es muy baja, por lo que la fuerza de gravedad sólo se pone de manifiesto en cuerpos de enorme masa, como la Tierra. Pero, como dijimos, la masa de los cuerpos se halla distribuida en puntos de altísima densidad, vinculados espacialmente entre sí por las fuerzas nucleares y electromagnéticas. De allí que el movimiento causado por un impulso externo a un cuerpo, que se transmite por el

entretejido de fuerzas electromagnéticas y nucleares a todos los puntos de masa que componen el cuerpo, hace que éstos accionen sobre sus respectivos campos gravitatorios, relativamente muy intensos, recibiendo por reacción un empuje inercial de las ondas gravitatorias del espacio vacío. Un aerolito volando es como un ciempiés que hace surf con las tablitas de sus trillones de pies sobre las agudísimas vibraciones gravitacionales del vacío.

Ajuste de nombres. De acuerdo a lo visto, nos gustaría cambiar algunos nombres. Los físicos modernos distinguen normalmente entre energía *cinética* y energía *potencial*, entendiendo por aquella la energía de un cuerpo en movimiento, que sería como una energía *actual* (en sentido aristotélico), e incluyendo en ésta a las demás formas de energía: gravitatoria, elástica. Pero el adjetivo *cinético* significa *relativo al movimiento*, lo que bien podría decirse de toda energía, porque la energía es una potencia activa de movimiento local, y bien podría denominarse por el acto al que se ordena. Y el adjetivo *potencial* también podría decirse de toda energía, porque por definición es una potencia activa (que es potencia en el sentido primero y más propio). Ahora a nosotros nos gustaría llamar *energía inercial* a la implicada en el movimiento de un cuerpo, porque sabemos que la denominación *energía cinética* esconde un error, pues se supone que es la energía que tiene un cuerpo por el simple hecho de moverse a sí mismo, y en realidad el movimiento es efecto de la energía que se conserva en la vibración del medio, provocada por el primer impulso que puso al cuerpo en movimiento. Y este error se pone más de manifiesto al contraponer energía cinética a energía potencial, queriendo entender aquella como una energía del acto mismo del movimiento. Por eso preferimos llamarla energía *inercial*, en cuanto es una energía relacionada al fenómeno de la inercia, siendo tan *potencial* como las demás. Pero como los cambios de nombre, si no se hacen usuales, sólo sirven para confusión, nos quedaremos con las ganas de hacerlo. Eso sí, nadie nos impedirá hablar de vez en cuando de *energía cinética o inercial*, y de evitar, como venimos haciendo, usar la denominación *energía potencial* como contraparte de aquella.

5º Conclusión

El físico que se convierte del modernismo newtonio-einsteiniano –– la física matemático-relativista – al realismo aristotélico-tomista – la física entitativo-absolutista – (nos gusta dar nombres) debe dejar de pensar el espacio como un vacío de substancia, para pasar a pensarlo como una substancia, o parte de las substancias, vacía de masa, lo que no se hace difícil porque la física pide a gritos esta concepción. También debe dejar de imaginar el movimiento inercial como movimiento por sí mismo, para tener en claro que nada se mueve si no es movido por otro, por lo que el movimiento inercial es por acción y reacción con el medio (sea como sea que se explique), y sabemos que esto no es tan fácil, pues la imagen anterior responde más a la experiencia sensible.

Hechos ambos ajustes, el físico convertido entiende que el espacio vacío pueda ser el marco de referencia inmóvil de todo desplazamiento local, concepción más simple a sostener mientras no se vea la necesidad de lo contrario (no se impone con la necesidad de las dos anteriores). Y la cuarta idea, que nos hacemos nosotros pero no imponemos, es que todo espacio vacío es parte de las substancias con masa, y depende en su esencia y existencia de la distribución de masas, de modo que nos imaginamos las substancias naturales dotadas de una especie de aura espacial que proyecta su masa corporal de acuerdo a su situación gravitatoria (esta última idea podría implicar alguna especie de cambio local de las partes vacías).

Como hemos visto y seguiremos viendo, las matemáticas de la Física newtoniana no cambian en nada. La teoría de la relatividad de Einstein, en cambio, debería ser totalmente revisada, pues estamos negando su principio y fundamento, que es la relatividad del marco de referencia. Pero los que tienen cierta experiencia de las teorías físicas saben que negar el principio fundamental de una teoría no implica negar todos los fenómenos que ella explica, porque bien pueden explicarse de otra manera. De allí que digamos que la teoría de la relatividad debe ser *revisada* y no *descartada*. Eso sí, que la revise quien pueda. Y por lo que sabemos de oídas de la Física cuántica, nos parece que muchas cosas de ella se entenderían mejor en realismo tomista.

IV. Elementos para una teoría del movimiento gravitatorio-inercial

Éste es un parágrafo que dejaremos totalmente abierto a sugerencias y ocurrencias.

1º Velocidad de onda y velocidad de arrastre

Una de las vías que se nos ofrecen para el análisis del movimiento gravitatorio-inercial es la posible semejanza con los diversos movimientos ondulatorios, muy estudiados en la Física moderna, como hicimos más arriba al referirnos a la transferencia de energía en el pulso de una cuerda. En esta comparación hay una distinción que nos parece importante. Una cosa es la transferencia de energía en un medio elástico, y otra es la posibilidad de que el medio elástico arrastre algo de naturaleza distinta. Una boya en el mar va siendo arrastrada por las olas,

pero una cosa es la velocidad de las olas y otra la velocidad de arrastre de la boya. En las olas hay transferencia de energía pero no de masa, mientras que el movimiento de la boya supone traslado de masa. Nos parece que algo análogo hay que tener en cuenta en el movimiento de las partes másicas, que son como la boya, en las ondulaciones del vacío, que son como las olas del agua.

Toda vibración en un medio elástico tiene un período de oscilación que depende de la naturaleza del medio. El período de la oscilación en un resorte depende de su constante k (según la ley de Hooke), de manera que un resorte más duro (k mayor) tiene un período de oscilación más breve, mientras que uno más blando (k menor) tiene un período más largo. Y según que el período sea más breve o más largo, la energía se transfiere más rápida o más lentamente. Una vibración en un resorte va relativamente lento, pero en una barra de acero, que puede asimilarse a un resorte cuya constante k depende de su elasticidad, va muchísimo más rápido. Ahora bien, según sugieren los simples cálculos que hicimos, no hay medio elástico más rígido que el campo gravitatorio, que vibra para relaciones de masa/longitud altísimas (mayores que 10^{27} kg/m). Por lo tanto, cabe pensar que la velocidad de transferencia de energía en el espacio es también altísima, o más bien, *máxima*. Y así parece, pues la transferencia de energía en el espacio vacío en forma electromagnética muestra ser la velocidad máxima de la naturaleza. Suponemos, entonces, que la velocidad de transferencia de energía gravitatoria del espacio vacío es también la misma velocidad de la luz. Pues bien, así como un cuerpo arrastrado por las olas no puede ir más rápido que las mismas olas (sí puede, pero no en la misma dirección de las olas), así también es de suponer que el surf inercial no puede alcanzar la velocidad de la luz, que es probablemente la velocidad de las vibraciones del vacío (sería ir más rápido que lo que empuja). Por aquí nos vemos en cierto acuerdo con Einstein.

Lo que la teoría del movimiento gravitatorio-inercial debería explicar es por qué las partículas de masa son arrastradas a la velocidad que responde al cálculo de la energía cinética $E = ½ m v^2$, al menos para velocidades mucho menores que las de la luz. Es totalmente esperable que a una acción mayor en el medio le responda una mayor reacción, pero otra cosa es explicarlo en detalle.

C. La conservación de la energía cinético-gravitatoria

I. Naturaleza y energía

Inercia y gravedad son dos potencias pasivas de los cuerpos que se fundan en la masa, cualidad pasible. La inercia es cierta renuencia al movimiento, y la gravedad es cierto apetito de incorporación, de manera que por la inercia los cuerpos tienden a estar quietos, y por la gravedad tienden a estar unidos. Así visto, la energía parecería ser algo violento o antinatural, porque un cuerpo posee energía cinética o inercial en la medida en que está en movimiento, lo que se opone a la tendencia de la inercia, y posee energía gravitatoria en la medida en que está separado de otro, lo que se opone a la tendencia de la gravedad. Sin embargo, ya hemos señalado que el triunfo de la simple corporeidad, en la quietud y la densidad, implica la muerte de la naturaleza, pues impide la complejidad y operatividad de los organismos naturales: el cuerpo frío y compacto de un agujero negro es como el cadáver del orden natural. La energía, entonces, es para las substancias corporales como el principio vital para las substancias vivas porque, como dijimos, es potencia activa de movimiento local (segunda especie de cualidad), constituyendo como la primera resultancia de orden accidental de la tendencia a la operación que tiene toda forma substancial. Todo ente creado tiende a obrar, y las substancias corpóreas necesitan la energía como potencia básica de todas sus operaciones.

No hay que considerar la energía, entonces, como en oposición a las pasividades de los cuerpos, sino más bien como una activación de las mismas: como la inercia es renuente al movimiento, hay que hacer trabajo para mover un cuerpo y adquiere energía cinética; como la gravedad apetece la incorporación, hay que hacer trabajo para separar dos cuerpos y adquieren energía gravitatoria. Además, dichas pasividades deben considerarse siempre en conjugación: la gravedad atrae los cuerpos separados y la inercia se resiste, evitando que los cuerpos permanezcan incorporados; la inercia conserva los movimientos y la gravedad se resiste, evitando que los cuerpos terminen dispersados. La energía cinético-gravitatoria, que ya podemos unir bajo un mismo nombre pues estamos convencidos que tiene un mismo fundamento, se da como cierta actual tensión de la inercia y la gravedad, siendo moderada por las tendencias en cierto modo contrarias de ambas pasividades. Lo que pudiera verse de negativo respecto de una tendencia, se vuelve positivo al considerar la otra, y viceversa. El hecho que se mueva lo que se resiste a hacerlo (energía cinética) tiene como feliz consecuencia que no quede atrapado por la unificación gravitatoria; y el hecho de que esté separado lo que tiende a estar unido (energía gravitatoria) tiene como feliz consecuencia que no se quede quieto por inercia.

II. INTERCAMBIOS ENTRE ENERGÍA CINÉTICA Y GRAVITATORIA

El juego entre gravedad e inercia es un hecho de observación cotidiana, pues en muchos procesos se ve que la energía cinética se cambia o transforma en energía gravitatoria, y la energía gravitatoria en cinética. Si subimos un florero al balcón, la energía gravitatoria que adquiere al ser separado de la tierra es igual al trabajo que hay que tomarse en subirlo, esto es, el peso del florero por la altura del balcón: $T = Peso \times altura = mgh = E_g$ Si ahora dejamos caer el florero, éste adquiere una energía cinética igual al trabajo que hace el florero bajando: $E_c = \frac{1}{2}mv^2 = T = Peso \times altura = mgh = E_g$ La energía que se le confirió al florero al subirlo al balcón, se invierte al caer en energía cinética o inercial. Si ahora lanzamos hacia arriba una piedra con la misma masa del florero (pues el florero se rompió) a la misma velocidad con que cayó el florero: $v = \sqrt{2gh}$ es fácil ver que va siendo frenada por la fuerza de gravedad hasta detenerse a la misma altura del balcón de donde habíamos tirado el florero. Ahora la energía cinética inicial se convirtió en energía gravitatoria. Y si nadie atrapa la piedra, ésta emprende el proceso inverso y vuelve a tierra con la misma velocidad con que se la lanzó. En todo esto estamos suponiendo que el aire no frena floreros ni piedras. Vemos que aquí tenemos un cierto ciclo conservativo entre energía cinética y energía gravitatoria.

Al considerar el movimiento de traslación en el plano, analizamos el caso de los proyectiles. Es el mismo caso de nuestra piedra, pero que no es lanzada verticalmente, sino con cierto ángulo. Aquí teníamos la componente vertical de la velocidad que es frenada por la gravedad, y la componente horizontal que se conserva por inercia. También en este caso más complejo tendremos que, durante todo el vuelo de la piedra, si no hay fricción con el aire, se conserva la energía cinética inicial, perdiendo energía cinética a medida que la piedra sube, que se invierte en energía gravitatoria, y recuperándola a medida que baja.

Algo semejante ocurre con un niño en un columpio o hamaca. Se lo eleva una cierta altura, y de allí se lo suelta, adquiriendo cierta velocidad en la parte más baja y subiendo a la misma altura en la parte opuesta, y de allí volviendo. La energía gravitatoria de los puntos extremos es igual a la energía cinética en la parte más baja. Este movimiento es el que en Física se estudia como *péndulo*.

El gran mérito de Newton fue poder explicar por las mismas causas el movimiento de la piedra arrojada por un niño y el movimiento del cometa de Halley. En éste también se da el juego conservativo entre energía gravitatoria y energía inercial. En la larga órbita que describe alrededor del Sol hay un punto de alejamiento máximo, en el que tiene máxima separación y, por lo tanto, máxima energía gravitatoria, con cierta energía cinética por la velocidad tangencial al Sol. Luego se irá acercando al Sol, siendo acelerado por la fuerza de gravedad solar, hasta alcanzar el punto de acercamiento máximo, donde tiene energía gravitatoria mínima, pues está a la mínima distancia del Sol, y energía cinética máxima. Siempre en ambos puntos, y en todos los puntos intermedios, la suma de la energía cinética y gravitatoria es la misma. Como la piedra que lanzamos hacia arriba.

III. LA CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICO-GRAVITATORIA

Cuando dos o más cuerpos se mueven en un medio sin fricción y sin la presencia de más pasividades que las de la gravedad e inercia, el juego de intercambio entre la energía cinética y gravitatoria hace que se cumpla siempre la *ley de conservación de la energía*. La energía total, que consiste en la suma de la energía cinética más la energía gravitatoria del sistema, es siempre constante: $E_T = E_c + E_g = constante$

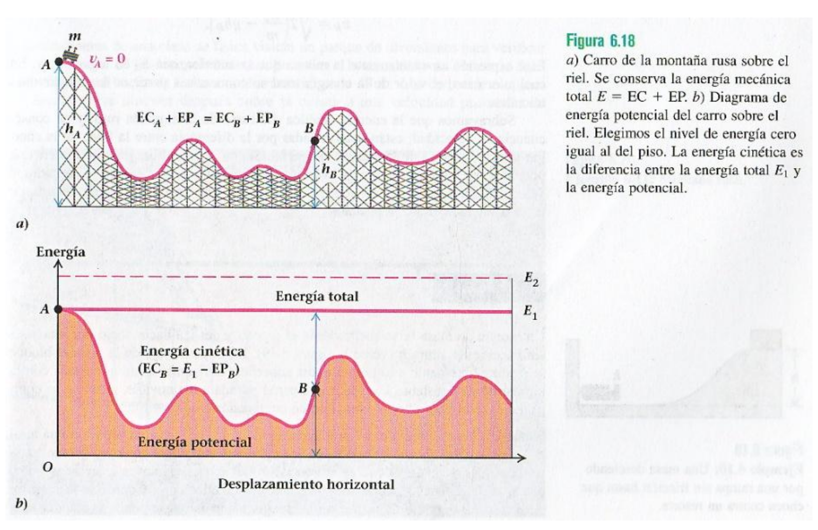


Figura 6.18 *a)* Carro de la montaña rusa sobre el riel. Se conserva la energía mecánica total E = EC + EP. *b)* Diagrama de energía potencial del carro sobre el riel. Elegimos el nivel de energía cero igual al del piso. La energía cinética es la diferencia entre la energía total E_1 y la energía potencial.

El trencito de la montaña rusa, en un parque de diversiones, comienza su emocionante viaje a cierta altura del piso, con lo que posee un cierto capital inicial de energía gravitatoria. Cuando se lanza en bajada, se va acelerando, para luego frenarse un poco en la siguiente subida. Suponiendo que tiene un sistema de deslizamiento muy aceitado y buena aerodinámica, se hace fácil calcular la velocidad en cada punto del camino, pues lo que pierde en energía gravitatoria lo gana

en energía cinética. Si h_A es la altura en el punto A de inicio, la energía total es igual a la energía gravitatoria en A. Luego, en cualquier punto B del recorrido, la energía cinética será igual a la pérdida de energía gravitatoria, que depende de la altura. Entonces tenemos:

$$E_T = E_c + E_g \rightarrow mgh_A = \frac{1}{2}mv_B^2 + mgh_B$$

De donde es fácil despejar la velocidad: $v_B = \sqrt{2g(h_A - h_B)}$ Es interesante comprobar que la velocidad no depende del número de pasajeros que se suban al tren.

IV. VELOCIDAD DE ESCAPE

Uno de nuestros alumnos calculó la velocidad que alcanzaba un cuerpo al caer de cierta altura por efecto de la fuerza gravitatoria, y le dio $v = \sqrt{2gh}$ Si invirtiéramos el problema y quisiéramos saber a qué velocidad inicial v_0 debemos lanzar hacia arriba un cuerpo para que llegue a una altura h, es fácil ver que se calcula de la misma manera: $v_0 = \sqrt{2gh}$ pues sólo tenemos que pasar a la inversa la filmación del primer problema. Si en lugar de tirar floreros con la mano, juego peligroso si el jarrón es caro o muy querido de la mamá, tiramos cohetes al espacio, juego mucho más peligroso y más caro, ya hay que tener en cuenta la variación de la fuerza de gravedad con respecto a la altura que alcanza el cohete. Ahora bien, en lugar de considerar fuerza y desaceleración, nos conviene aplicar la ley de la conservación de la energía.

Si disparamos el cohete con un cañón vertical, la energía cinética inicial que posee el cohete depende de su masa y de la velocidad inicial a la boca del cañón. Esta energía se irá invirtiendo en energía gravitatoria a medida que el cohete sube, hasta que el cohete se detenga cuando toda la energía cinética se haya convertido en energía gravitatoria. Como ya conocemos la ecuación de la energía gravitatoria, tenemos:

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = GM_Tm(\frac{1}{R_T} - \frac{1}{y})$$

Hemos puesto y en lugar de x porque pensamos en altura. La distancia y se mide desde el centro de la tierra, por lo que es igual al radio de la tierra más la altura h a la que se eleva: $y = R_T + h$ Podemos calcular, entonces, qué velocidad hay que darle al cohete para que alcance la altura h que deseamos:

$$v_0 = \sqrt{2GM_T(\frac{1}{R_T} - \frac{1}{y})} = \sqrt{\frac{2GM_Th}{R_T(R_T + h)}}$$

Podemos simplificar las constantes, para no andar manejando la enorme masa de la tierra y la ínfima constante G. Basta tener en cuenta que la fuerza de gravedad en la superficie de la tierra, esto es, a distancia R_T, causa en los cuerpos la aceleración de la gravedad g, valor simple y conocido nuestro. Tenemos, entonces:

$$F_g = mg = G\frac{M_Tm}{R_T^2} \rightarrow GM_T = gR_T^2$$

Si reemplazamos esta equivalencia en la ecuación de la velocidad, nos queda:

$$v_0 = \sqrt{\frac{2ghR_T}{R_T + h}}$$

Volvemos a ver que la velocidad no depende de la masa, pues cualquier cuerpo que se lance a dicha velocidad alcanza la misma altura. El valor de g, por supuesto, es el de la aceleración en la superficie de la Tierra, que disminuye con la altura, pero que lo usamos como constante que reemplaza las otras dos incómodas. Tampoco es muy cómoda R_T expresada en metros, pero ¿Usted qué quiere?

Sabemos que la energía gravitatoria no tiende a aumentar indefinidamente, sino que tiene un límite, pues al aumentar la distancia de separación al infinito, nos da $E_{gmax} = G\frac{M_Tm}{R_T}$ Por lo tanto, cuando la energía cinética inicial del cohete es igual o mayor a la energía gravitatoria máxima, el cohete escapa definitivamente de la atracción de la Tierra:

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = G\frac{M_Tm}{R_T} \rightarrow v_{escape} = \sqrt{\frac{2GM_T}{R_T}}$$

También podemos calcular la velocidad de escape de la ecuación de velocidad inicial que habíamos obtenido. Para h tendiendo a infinito, tenemos que $R_T + h \cong h$ Por lo tanto nos queda: $v_{esc} = \sqrt{2gR_T}$ que si tenemos en cuenta que $GM_T = gR_T^2$ comprobamos que es lo mismo que habíamos calculado del otro modo.

Quizás a Usted no le importe mucho la velocidad de escape de la Tierra, porque no piensa enviar ningún cohete al espacio exterior, pero a Neil Armstrong le importaba bastante cuando tenía que escapar de la Luna para regresar a su casa. ¿Qué velocidad de despegue tenía que alcanzar para que la Luna no lo volviera a atrapar? El radio de la Luna es de 1738 km, y la gravedad en su superficie es un sexto de la terrestre. Tenemos entonces:

$$v_{esc} = \sqrt{2\frac{g}{6}R_L} = \sqrt{\frac{9.8 \times 1.7\ 10^6}{3}\frac{m}{sg}} = 2.4\frac{km}{sg} = 8483\ \frac{km}{h}$$

Parecer haberse comprobado, según predecía la teoría de la relatividad, que la luz no deja de sufrir la influencia de la gravedad. En este supuesto, y aceptando también que no hay velocidad física mayor que la de la luz, podemos calcular cuál es la relación entre masa y radio de un cuerpo, muy grande o muy denso, que hace que la velocidad de escape sea la de la luz. En este cuerpo el campo gravitatorio es tan intenso que nada podría escapar del mismo, ni siquiera la luz:

$$v_{esc} = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = c \quad \rightarrow R_s = \frac{2GM}{c^2} \quad \rightarrow \frac{M}{R} = \frac{c^2}{2G}$$

Al radio que hemos calculado le ponemos una *s* como subíndice porque se lo denomina *radio de Schwarzschild*, y es el radio que debe tener un cuerpo de masa M para que se convierta en un agujero negro. Vuelve a aparecer también la relación que habíamos puesto para que sea posible la hipótesis de que la inercia se deba a al campo gravitatorio. Podría parecer que esto constituye una gravísima objeción a nuestra hipótesis, porque el universo en que vivimos tendría que ser cuerpo negro. No damos, sin embargo, el brazo a torcer. Es muy razonable que el universo sea un cuerpo negro, con una gravedad de la que nada pueda escapar, pues en caso contrario, ¿a dónde podría ir, si no hay más espacio que el del propio universo, que no puede ser infinito? Que la luz no pueda escapar definitivamente no quiere decir que no puede darse ni viajar, sólo implica que siempre estaría volviendo hacia el centro del universo. Y lo mismo con los cuerpos másicos, que no son compactos sino que tienen sus masas distribuidas en puntos muy concentrados.

Hasta aquí llegamos. Sirva como introducción y aliento para desarrollar una Física verdaderamente científica, respetuosa de los grandes Maestros, Aristóteles y Santo Tomás, que se apoye en la causalidad para buscar conocer lo que las cosas son en realidad. Y llegará a ser, como debía, el estribo para subir a la Metafísica, descubriendo por fin la Causa Primera de tantas maravillas.